

不同作用因子下有机无机配施添加 DMPP 对氮素转化的影响*

殷建祯^{1,2} 俞巧钢^{1†} 符建荣¹ 马军伟¹ 邹平¹ 王欣欣¹
费杰² 方晓波²

(1 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

(2 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

摘要 研究不同作用因子下有机无机配施模式添加 DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)对土壤氮素形态转化的影响,为田间氮素管理和高效利用提供科学依据。采用好气恒温土壤培养试验,研究施肥用量、水分条件、环境温度、土壤类型等不同作用因子,对有机无机氮肥配施模式添加 DMPP 土壤氮素形态转化的影响。结果表明,60 d 时,高用量有机无机配施处理比常规有机无机处理铵态氮含量提高 89 倍,硝态氮减少 57.8%;与湿润培养相比,淹水条件下有机无机配施模式添加 DMPP,60 d 内土壤铵态氮含量持续增加,硝化进程受抑制更显著;60 d 时 15℃ 处理铵态氮含量较 25℃ 处理高 56 倍,硝态氮含量低 18 倍;60 d 时红壤中铵态氮含量分别是小粉土和青紫泥的 30 倍与 31 倍,而硝态氮含量仅为二者的 55.7% 与 33.6%。25℃ 时青紫泥、小粉土和红壤中有机无机配施模式添加 DMPP 最佳抑制效果在 30~40 d,有效作用时间可达 60 d。DMPP 能够明显增加有机无机配施模式土壤中铵态氮含量,有效延长铵态氮在土壤中停留的时间,使硝态氮含量长期维持在较低水平。高施肥水平有机无机配施模式下 DMPP 的抑制效果更突出。低温环境有利于 DMPP 对硝化进程的抑制。不同作用因子下,有机无机配施模式添加 DMPP 对氮素转化影响的深层作用机理值得进一步研究。

关键词 硝化抑制剂;DMPP;尿素;有机无机肥;氮素转化

中图分类号 S143.1+6 **文献标识码** A

目前,氮肥利用率低和农业环境污染严重是我国农业生产中普遍存在的问题。大量的研究表明,我国氮肥的利用率仅为 30%~41%,高产地区甚至低于此值^[1]。因此,提高氮素利用率是提高产量,节约能源,降低农业污染的有效途径。硝化抑制剂可以抑制土壤中的硝化过程,有效减轻氮素流失,提高氮素利用率,且生产成本低,施用效果显著,一直受到国内外研究者的广泛重视^[2-3]。DCD(双氰胺)是国内外普遍使用的硝化抑制剂,其作用效果明显,但也存在着水溶性高,易淋失,施用量大,作用时间短;重复施用易导致其半衰期缩短,降解速率加快;施用不当易对植物产生毒害等缺点^[4-5]。DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)作为一种新型的硝化抑制剂克服了以上缺点,抑制效果明显,作用时间长,能显著增加铵态氮肥的利用率,减少氮素对环境的污染^[6-8]。相关研究表明,DMPP 是通过抑制

土壤硝化反应的第一步,即抑制 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 而起到抑制作用^[9-10]。目前,国内外学者对 DMPP 的研究主要集中于其农学效应和环境生态效应的考察,其中施用 DMPP 的效果及其影响因素的研究一直是热点领域^[6-13]。但是,目前对于 DMPP 研究多是基于施用铵态氮肥及尿素等无机氮肥条件下开展的,针对有机无机氮肥配施模式下施用 DMPP 对土壤氮素转化影响研究甚少。采用有机无机肥配合施用模式,是培肥和维持土壤地力的重要途径,有助于农田土壤环境质量保育和可持续利用,也有利于综合消纳畜禽粪便等废弃物,同时可以提高氮素在土壤-作物系统中的回收利用率。但有机肥与无机肥的配合施用,仍然会有相当量的土壤氮素损失,对生态环境造成污染^[14]。DMPP 对无机铵态氮的高效抑制效果已有相关研究,但是在不同作用因子下,尤其是在目前大力推广的有机无机氮肥配施

* 国家自然科学基金项目(31172030)浙江省自然科学基金项目(Y3090180)资助

† 通讯作者:俞巧钢, E-mail: yqganghzzj@sina.com

作者简介:殷建祯(1986—),男,河北省张家口市人,硕士研究生,主要研究方向为硝化抑制剂的农业应用。E-mail: yjianzhen@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-06-25;收到修改稿日期:2013-01-06

模式下,DMPP 对土壤氮素转化的影响有待进一步研究。本研究采用室内土壤培养的方法,通过模拟施肥用量、水分条件、环境温度、土壤类型等不同作用因子,来考察其对有机无机氮肥配施模式添加 DMPP 时土壤氮素转化的影响,从而明确有机无机配施模式添加 DMPP 在不同条件下土壤氮库的动态变化特征,以期为农田氮肥高效管理和降低氮素损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样与试剂

供试土样分别采自浙江省绍兴市东湖镇、嘉兴市海宁杨渡镇、金华市蒋堂镇三个地区农田当中 0~20 cm 耕作层土壤,分别为典型的青紫泥、小粉土和红壤。土样经风干,剔除杂质,过 2 mm 筛后备用。用常规方法测定供试土样的基本理化性质(表 1)。

供试尿素选用分析纯试剂;有机肥为商品有机肥,其铵态氮、硝态氮及全氮的含量分别为 0.5 g kg^{-1} 、 2.9 g kg^{-1} 和 15.8 g kg^{-1} ;硝化抑制剂选用德国进口纯度为 97% 的 DMPP。

1.2 试验设计

模拟有机无机配施模式(其中有机氮所占比例为 30%,此添加比例以浙江杭嘉湖习惯用肥及长期定位试验用肥比例为依据^[15])添加硝化抑制剂 DMPP(除 CK 外),添加量以最优量即相对于氮素含量的 1% 计,设置以下试验。试验 I:有机无机配施模式添加 DMPP 对氮素转化的影响:选择典型的青紫泥,水分含量为田间最大持水量的 60%,氮素施用水平为 150 mg kg^{-1} (30% 有机肥 + 70% 尿素),分别设置不添加 DMPP 的对照(CK)和添加 DMPP 的处理(Nitrification inhibitor, NI),置于 25℃ 生化培养箱中培养。试验 II:不同施肥用量下有机无机配施模式添加 DMPP 氮素转化的影响:选择典型的青紫

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of tested soils

土壤 Soil	pH	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total nitrogen (g kg^{-1})	碱解氮 Alkali- hydrolyzable nitrogen (mg kg^{-1})	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg^{-1})	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus (mg kg^{-1})	速效钾 Available potassium (mg kg^{-1})	黏粒 Clay (g kg^{-1})	粉粒 Silt (g kg^{-1})	砂粒 Sand (g kg^{-1})
青紫泥 Blue clayey paddy soil	5.89	25.30	1.60	146.6	8.32	17.54	25.38	76.01	456.0	432.0	112.0
小粉土 Silt paddy soil	7.18	10.80	0.80	68.66	4.82	9.23	45.25	64.04	275.0	638.0	87.00
红壤 Red soil	4.08	16.80	1.00	96.64	5.04	9.26	25.11	72.06	251.0	464.0	285.0

泥,水分含量为田间最大持水量的 60%,分别设置不施肥(No fertilizer, NF),有机无机配施 N 150 mg kg^{-1} (Organic manure + urea, OMU; 30% 有机肥 + 70% 尿素),高量(双倍用量)有机无机配施 300 mg kg^{-1} (Double OMU, DOMU; 30% 有机肥 + 70% 尿素),置于 25℃ 生化培养箱中培养。试验 III:不同水分下有机无机配施模式添加 DMPP 氮素转化的影响:选择典型的青紫泥,分别设置淹水(Flooded)和湿润(Wet)两个处理,其中湿润处理以土壤田间最大持水量的 60% 计,样品置于 25℃ 生化培养箱培养,其中氮素施用水平为 150 mg kg^{-1} (30% 有机肥 + 70% 尿素)。试验 IV:不同培养温度下有机无机配施模式添加 DMPP 氮素转化的影响:选择典型的青紫泥,

土壤水分含量为田间最大持水量的 60% 且氮素施用水平为 150 mg kg^{-1} (30% 有机肥 + 70% 尿素),设置 15℃、25℃ 和 35℃ 三个温度处理,分别置于三个同一型号的培养箱内培养。试验 V:不同土壤类型下有机无机配施模式添加 DMPP 氮素转化的影响:分别选择青紫泥(Blue clayey paddy soil, BCPS)、小粉土(Silt paddy soil, SPS)和红壤(Red soil, RS),土壤水分含量为田间最大持水量的 60% 且氮素施用水平为 150 mg kg^{-1} (30% 有机肥 + 70% 尿素),置于 25℃ 生化培养箱中培养。试验中各处理均重复 3 次。

分别称取过 2 mm 筛土壤 350 g,有机肥与尿素直接加入土壤,DMPP 用过 0.25 mm 的土壤稀

释后分取相应的倍数,与土样充分混匀装入高型烧杯中,调节土壤含水量后用 Parafilm 膜封口,将所有处理放入相应温度的培养箱中,每隔 2 d 通过称重法补充培养过程中损失的水分。培养开始后第 5 天取一次样,以后每隔 10 d 取一次样,分别测定土壤中铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的含量。

1.3 测定方法

取土样 10 g,用 2 mol L^{-1} 的 KCl 溶液浸提 ($m_{(\text{KCl})} : m_{(\text{土})} = 10 : 1$,振荡 30 min),铵态氮质量浓度用靛酚蓝比色法测定,硝态氮质量浓度采用紫外分光光度计法测定,亚硝态氮质量浓度用盐酸萘乙二胺比色法测定。土壤 pH 用 pH 计测定,用无二氧化碳蒸馏水 ($m_{(\text{蒸馏水})} : m_{(\text{土})} = 2.5 : 1$) 浸提。用 105°C 烘干法测定含水量,其他土壤理化性质参照常规划分析方法^[16]。

1.4 数据处理

数据分析利用 SPSS 13.0 软件。

表观硝化率以硝态氮占无机态氮的比例表示,即

$$\text{表观硝化率}(\%) = \left[\frac{\text{NO}_3^- - \text{N}}{(\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N})} \right] \times 100$$

2 结果

2.1 有机无机配施模式添加 DMPP 对氮素转化的影响

整个培养期间,铵态氮(图 1a)和亚硝态氮(图 1c)含量呈下降趋势,硝态氮(图 1b)含量呈上升趋势,与不添加 DMPP 相比,有机无机配施模式添加 DMPP 铵态氮的含量明显提高,硝态氮含量明显降低,亚硝态含量变化不显著(图 1)。40 d 时添加硝化抑制剂 NI 处理与未添加抑制剂的 CK 相比,铵态氮含量差异极显著($p < 0.01$),差值达最大,60 d 时 NI 处理铵态氮、硝态氮及亚硝态氮含量与 CK 处理持平。与 CK 处理相比,NI 处理中铵态氮在土壤中停留时间延长了 40 d 左右。这表明有机无机氮肥配施模式添加 DMPP,对硝化作用的进行有强烈的抑制作用,可有效保持土壤铵态氮的氮素形态。

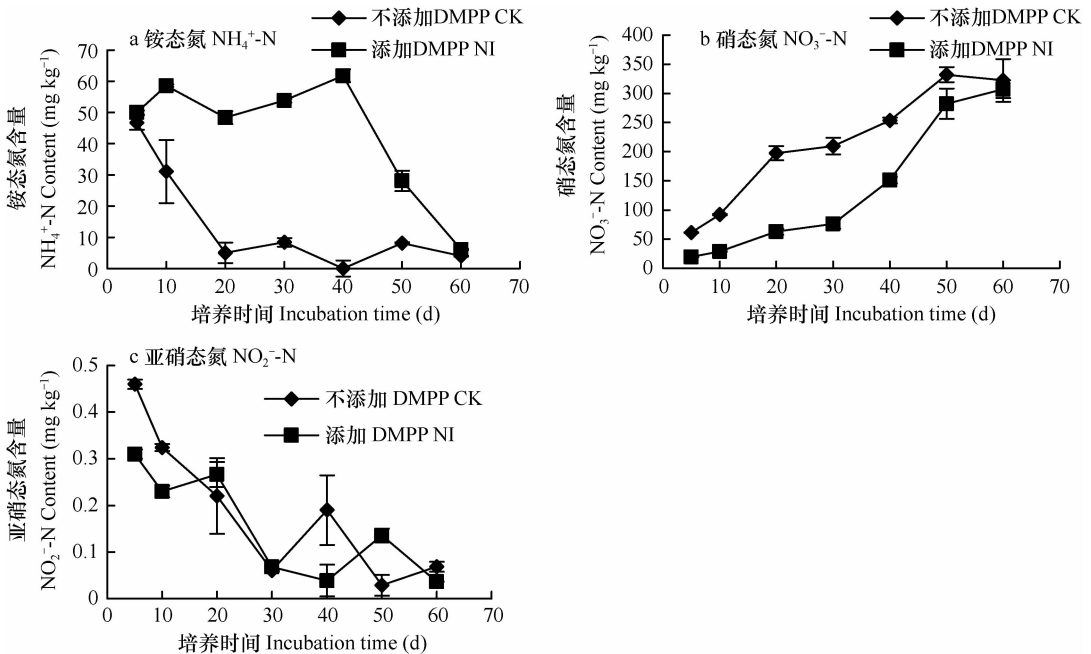


图 1 有机无机配施模式添加 DMPP 土壤氮素的动态变化

Fig. 1 Changes in $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ content in soils subjected to combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP

2.2 施肥用量对氮素转化的影响

从图 2a 铵态氮动态变化可知,不施肥处理铵态氮含量迅速下降,20 d 左右硝化反应基本完成。培养过程中,高配合施肥(高量有机无机配施模式)状态下土壤中铵态氮的含量远高于其他两个处理,20 d

后铵态氮的含量为常规有机无机配施处理的 2 倍以上。60 d 时,高量有机无机配施处理比常规有机无机处理铵态氮含量高 89 倍。其原因一方面是较高量的施氮水平使铵态氮含量增加,另一方面是施氮量的增加使单位重量的土壤中含有更多的 DMPP

抑制剂,DMPP 的高效硝化抑制作用得以充分发挥所致。

不施肥、配合施肥及高配合施肥处理,硝态氮的动态变化趋势一致(图 2b),10~40 d 硝态氮含量缓慢增加,40 d 后随着 DMPP 作用效果减弱,硝态氮含量迅速增加,表明 40 d 左右 DMPP 作用效果开始减弱。高配合施肥处理的硝态氮含量始终低于配合施肥处理,其中 60 d 时高用量有机无机配施处理比常规有机无机处理硝态氮减少 57.8%,表明高配合施肥处理下硝化作用受到了强烈的抑制。这与高配合施肥处理由于施肥量大,使单位重量的土壤中含有更多的硝化抑制剂 DMPP 有关。

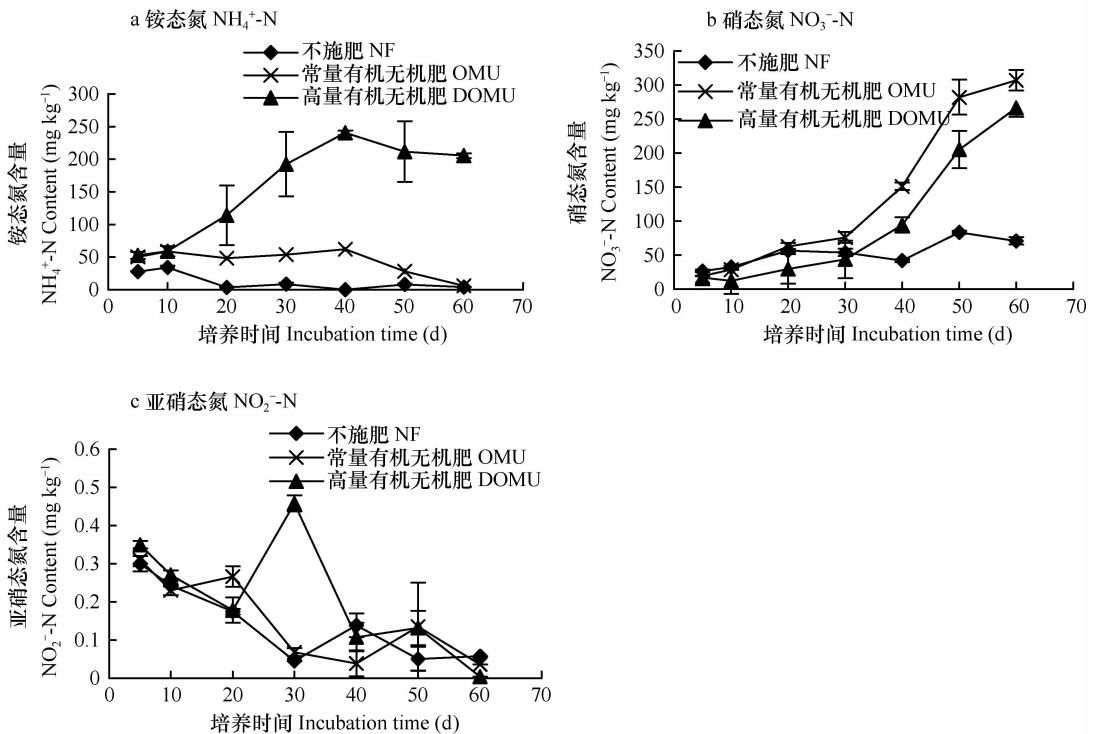


图 2 不同施肥用量铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的动态变化

Fig. 2 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ content in pots different in fertilization rate

2.3 水分条件对氮素转化的影响

由图 3a 铵态氮动态变化可知,有机无机配施模式湿润土壤中添加 DMPP 后,40 d 内铵态氮含量一直维持在很高的水平,40 d 后铵态氮含量迅速下降,直至 60 d 后硝化作用基本完成。这表明,40 d 后湿润条件下的 DMPP 有效性开始缓慢下降。淹水土壤存在厌氧环境,铵态氮的浓度一直维持很高水平,与湿润土壤相比差异极显著 ($p < 0.01$)。

与铵态氮的动态变化相反(图 3b),随着培养时间的增加,湿润土壤硝态氮含量呈上升趋势,淹水土壤硝态氮含量保持稳定。在第 30 天之前,湿润土

壤的硝态氮含量增长缓慢;30~50 d 之间,硝态氮含量增长迅速;50 d 之后又趋于平缓。这是由于 30 d 之前,DMPP 有效抑制了硝化反应的进行,使得硝态氮的积累缓慢;30 d 之后 DMPP 作用效果减弱,硝化作用逐渐增强,硝态氮发生积累;50 d 之后,硝化反应的底物大幅减少,硝态氮的积累变缓。淹水土壤的硝化反应由于受到淹水缺氧和 DMPP 的抑制作用,导致硝态氮含量始终保持在很低水平,近乎为 0 mg kg^{-1} ,40 d 之后硝态氮含量有极微的上升趋势,但这一差异并不显著。

培养过程中,湿润土壤与淹水土壤中亚硝态氮

含量的变化趋势基本一致(图 3c)。40 d 之前由于 DMPP 有效抑制了铵态氮氧化为亚硝态氮,而亚硝态氮极不稳定易被氧化,致使土壤中的亚硝态氮不断降低,这一结果也证明了 DMPP 对硝化反应的第一步起作用^[10-11]。40 ~ 50 d 亚硝态氮含量有所上升,可能是因为 40 d 后 DMPP 作用减弱,土壤中硝化反应的第一步进程逐渐加强,使得亚硝态氮在土

壤中发生积累,这也与铵态氮及硝态氮的动态变化分析结果相一致。50 ~ 60 d,土壤中硝化反应底物被大量消耗,亚硝态氮含量随之降低。整个培养阶段,淹水土壤中亚硝态氮含量始终高于湿润土壤,这是由于淹水土壤存在厌氧环境,亚硝态氮相对湿润土壤而言比较稳定,使其不能被快速氧化为硝态氮所致。

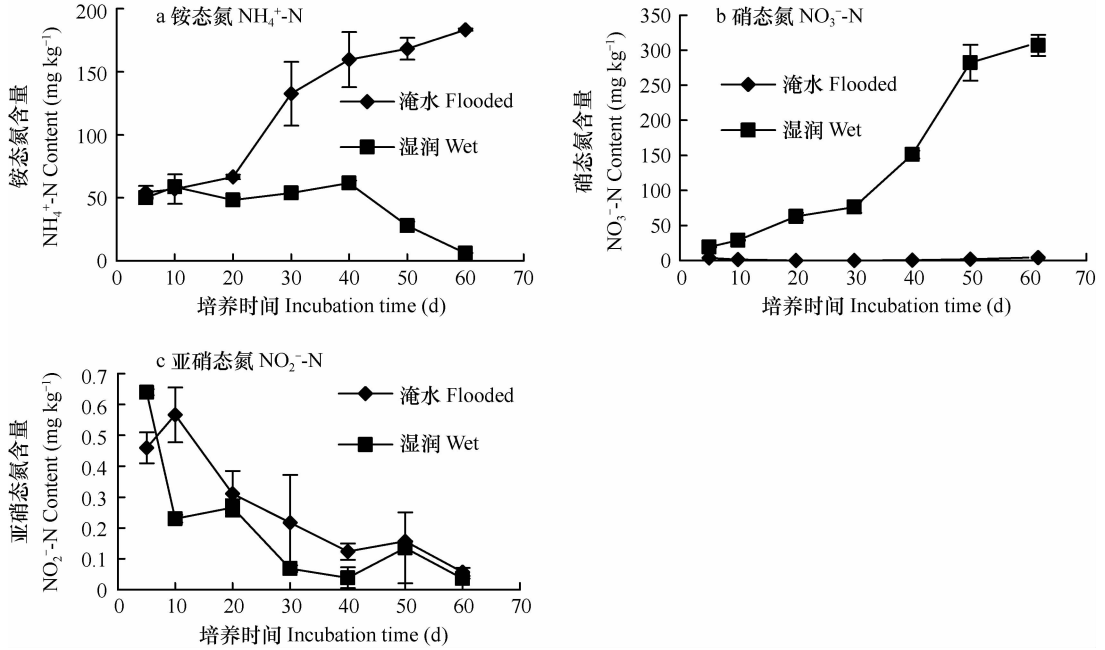


图 3 不同水分条件下铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的动态变化

Fig. 3 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ content in pots different in soil water level

2.4 不同温度对氮素转化的影响

由图 4a 铵态氮动态变化可知,采用有机无机配施模式,培养初期各处理土壤中铵态氮浓度水平相当,随着培养时间的增加,土壤中铵态氮含量表现出较大差异,10 ~ 60 d 内,铵态氮含量基本表现为 15℃ 最高,25℃ 次之,35℃ 最低。35℃ 条件下,第 20 天时铵态氮含量就降到较低水平,这说明较高温度会使 DMPP 活性下降,硝化抑制作用不明显。25℃ 条件下,40 d 前 DMPP 抑制作用效果明显,40 d 后 DMPP 作用效果减弱,到 60 天左右硝化反应基本完成。15℃ 条件下,有机肥逐渐矿化分解形成铵态氮,土壤铵态氮含量呈上升趋势。60 d 时 15℃ 处理铵态氮含量比 25℃ 处理高 56 倍。随着温度的降低,与硝化作用的有关微生物及酶活性降低,同时 DMPP 在低温下稳定不易被分解^[24],作用时间延长,导致了上述结果。

由图 4b 硝态氮动态变化可以看出,整个培养期间随着时间的延长,土壤中硝态氮含量呈上升

趋势,各处理中硝态氮含量表现为 35℃ > 25℃ > 15℃,这与铵态氮动态变化的规律相符合。60 d 时 15℃ 处理硝态氮含量比 25℃ 处理低 18 倍,60 d 内 15℃ 处理硝态氮含量始终保持在较低水平,直至培养结束。这与 DMPP 在 15℃ 条件下作用效果显著,且作用时间延长较长有关^[24]。前 30 d,25℃ 处理硝态氮含量水平较低,30 d 后硝态氮含量陡然增加,35℃ 处理硝态氮含量始终高于其他两个处理。这主要与温度升高,DMPP 在土壤中的降解加快,硝化抑制进程减弱,导致土壤硝化反应加强所致^[9,12]。

随着培养时间的延长,不同温度处理土壤中亚硝态氮含量呈下降趋势(图 4c)。整个培养过程,15℃ 处理亚硝态氮含量略高于其他两个处理,但是差异并不显著。这可能是由于 15℃ 时亚硝态氮较之其他两个温度下更加稳定,而且 15℃ 处理高浓度的铵态氮对亚硝酸氧化细菌有一定的抑制作用,造成亚硝态氮少量积累。25℃ 处理由于 DMPP 对硝化

进程第一步的有效抑制,亚硝态氮含量水平仍较低。而 35℃ 时 DMPP 硝化抑制作用减弱,氨氧化细菌作用增强,亚硝态氮含量略高于 25℃ 处理。从图

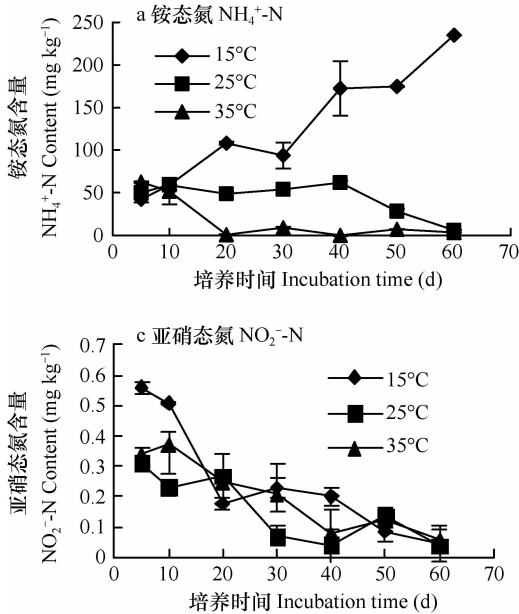


图 4 不同温度条件下铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的动态变化

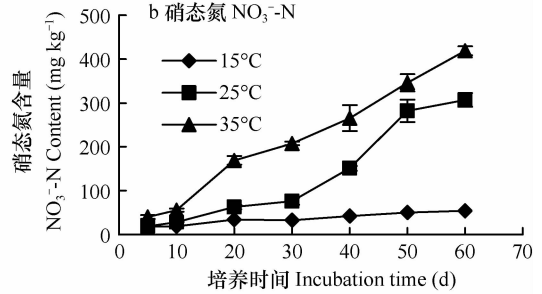
Fig. 4 Changes in NH_4^+ -N, NO_3^- -N and NO_2^- -N content in pots different in environmental temperature

2.5 不同土壤类型对氮素转化的影响

分析图 5a 铵态氮动态变化可知,随着时间的延长,红壤中铵态氮含量呈上升趋势,青紫泥和小粉土呈下降趋势。30 d 之前,三种土壤中的铵态氮含量保持稳定,相互间差异不明显,30 d 后,红壤中铵态氮开始积累,含量远高于青紫泥和小粉土,且差异显著($p < 0.05$)。40 d 前青紫泥和小粉土中铵态氮含量在 60 mg kg^{-1} 之间浮动,保持相对稳定。40 d 后铵态氮含量急剧下降,培养结束时其含量接近零。60 d 时红壤中铵态氮含量分别是小粉土和青紫泥的 30 倍与 31 倍。整个培养过程中,小粉土与青紫泥铵态氮动态变化趋势相一致,且小粉土中铵态氮含量略高于青紫泥。

各处理间,土壤中硝态氮含量呈现出相同的变化趋势(图 5b)。前 30 d 由于 DMPP 的抑制作用,土壤中硝态氮含量保持平稳略有上升,各处理间差异不显著。30 d 后 DMPP 作用效果减弱,土壤中硝态氮含量迅速增加,各处理间差异显著($p < 0.05$),表现为青紫泥 > 小粉土 > 红壤。50 d 后,青紫泥硝态氮含量有所上升,小粉土硝态氮含量保持稳定,红壤硝态氮含量有所下降,60 d 时红壤中硝态氮含量分别是小粉土和青紫泥的 55.7% 与 33.6%。

4c 还可知,亚硝态氮含量远低于铵态氮和硝态氮含量,亚硝态氮不是有机无机配施模式下土壤中氮素存在的主要形态。



不同的土壤类型中,亚硝态氮含量呈现出不规则的变化(图 5c)。30 d 之前,红壤中亚硝态氮含量不断上升,至第 30 天达到峰值,含量明显高于其他两个处理,30 d 后又迅速下降,最终含量同其他两个处理相近,大约在 0.1 mg kg^{-1} 左右。小粉土中,亚硝态氮水平呈现整体下降的趋势。青紫泥处理,20 d 前亚硝态氮含量保持稳定,20 ~ 40 d 迅速下降至接近于零,40 ~ 50 d 略有上升,50 ~ 60 d 又下降至接近于零。这可能是由于培养初期 DMPP 硝化抑制作用效果稳定,到 40 d 左右达到最优,40 d 后硝化抑制效果开始下降所致。

2.6 培养期间土壤中表观硝化率的动态变化

土壤硝化率能反映土壤硝化反应的状况。从表 2 可见,不添加 DMPP 抑制剂的处理,表观硝化率维持在很高的水平,大都在 95% 以上。不同施肥用量处理中,高配合施肥处理土壤铵态氮的表观硝化率极显著低于其他几个施肥处理($p < 0.01$)。这表明高配合施肥添加 DMPP 硝化抑制效果更为明显。有机无机配施模式下淹水处理存在嫌气条件,硝化作用极其微弱。湿润培养土壤中施加 DMPP,硝化率显著低于不施加 DMPP 的处理($p < 0.05$),表现为 30 ~ 40 d 之间表观硝化率明显上升,60 d 左右表观硝化率与对照持平。不同温度处理下,土壤中铵

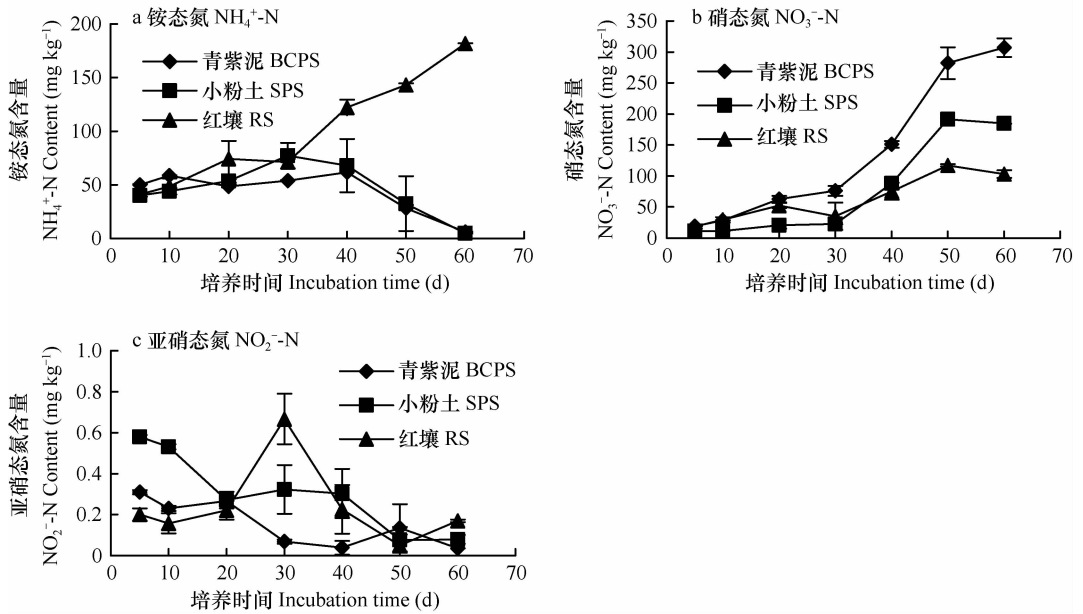


图5 不同土壤类型条件下铵态氮、硝态氮和亚硝态氮的动态变化

Fig. 5 Changes in NH_4^+ -N, NO_3^- -N and NO_2^- -N content in the soils different in soil type

态氮的表观硝化率大不相同。15℃处理中,硝化率一直保持在较低水平,且在培养结束后硝化率仍保持平稳。25℃处理中,同一时期的表观硝化率显著低于对照处理,但又显著高于15℃处理($p < 0.05$),培养60 d时硝化率与对照处理持平。35℃处理前10 d的表观硝化率显著低于对照处理($p < 0.05$),20~60 d硝化率与对照相当,甚至略高于对照。这说明低温有利于DMPP硝化抑制作用效果的发挥,

高温下硝化抑制作用时间缩短。不同土壤类型的处理中,前30 d小粉土中铵态氮表观硝化率显著低于其他两个处理($p < 0.05$),30 d后硝化率逐渐升高;红壤中铵态氮表观硝化率一直处在50%以下,培养结束后仍然保持这一趋势;整个培养过程中,青紫泥铵态氮表观硝化率一直显著高于其他两个处理($p < 0.05$),随着时培养间的增加硝化率不断上升。

表2 土壤中 NH_4^+ -N的表观硝化率

Table 2 Apparent nitrification rate of NH_4^+ -N in soils (%)

处理 Treatment	培养时间 Incubation time (d)						
	5	10	20	30	40	50	60
对照 CK	56.38	74.58	97.38	96.12	99.93	97.59	98.75
不施肥 NF	48.9	48.91	94.27	86.44	99.67	91.23	94.80
常量有机无机肥 OMU	27.64	32.81	56.26	58.51	70.97	90.91	98.04
高量有机无机肥 DOMU	24.13	17.33	20.60	18.49	28.15	49.21	56.49
淹水 Flooded	6.10	2.61	0.00	0.00	0.32	1.04	2.19
湿润 Wet	27.64	32.81	56.26	58.51	70.97	90.91	98.04
15℃	30.10	24.43	24.01	26.15	19.85	22.38	18.73
25℃	27.64	32.81	56.26	58.51	70.97	90.91	98.04
35℃	39.03	51.64	99.40	95.78	99.97	97.97	99.17
青紫泥 BCPS	27.64	32.81	56.26	58.51	70.97	90.91	98.04
小粉土 SPS	21.01	20.54	27.76	22.69	56.31	85.51	97.46
红壤 RS	31.14	37.59	41.27	32.92	38.07	45.02	36.21

注:硝化率(%) = $[\text{NO}_3^- \text{-N} / (\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N})] \times 100$ Note: Nitrification rate (%) = $[\text{NO}_3^- \text{-N} / (\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NO}_2^- \text{-N})] \times 100$

3 讨 论

有机无机配施模式下,尿素的水解,有机肥矿化,以及硝化作用的进行,势必会对土壤中的铵态氮含量产生影响。施用 DMPP 有效抑制铵态氮的氧化过程,使土壤中的铵态氮含量维持在一定的水平。不同的施肥量下,DMPP 的作用效果表现出较大差异。高用量有机无机配施处理铵态氮含量高于常规有机无机配合施肥处理,硝态氮含量低于常规配合施肥。究其原因,可能是由于高用量有机无机配合施肥处理中 DMPP 的用量高于常规配施处理,单位体积的土壤内,DMPP 与肥料颗粒的接触面积大于常规配施处理,从而使 DMPP 的有效性增强,硝化过程受到强烈抑制。综合铵态氮(图 2a)和硝态氮(图 2b)的动态变化图可以看出,高配合施肥处理中铵态氮含量高于常规配施处理,而硝态氮含量却低于常规处理,由此可以看出 DMPP 在高配合施肥状态下,更易充分发挥功效。

农业生产中水作和旱作是两种不同的生产方式,由于水分含量的不同,DMPP 的作用效果也大不相同。有机无机配施模式下添加 DMPP,淹水处理铵态氮含量明显高于湿润处理,硝态氮和亚硝态氮低于湿润处理,这可能是由于土壤水分含量高时,尿素与水分子充分接触,加速了尿素水解产生铵态氮,同时嫌气条件下硝化作用受到抑制,造成了铵态氮的迅速积累;而湿润土壤中与 DMPP 接触的土壤区域,铵态氮的氧化受到抑制^[25],不与 DMPP 接触的土壤区域,硝化作用仍在进行,所以淹水土壤中的铵态氮含量要高于湿润土壤,硝态氮及亚硝态氮含量低于湿润土壤。

有机无机配施模式下,不同温度对 DMPP 作用效果的影响差异显著。其作用效果表现为 $15^{\circ}\text{C} > 25^{\circ}\text{C} > 35^{\circ}\text{C}$ 。这表明低温有利于 DMPP 作用效果的发挥。由于低温下 DMPP 性质稳定分解缓慢,且低温状态下微生物活性减弱,硝化过程变缓,而较高温度状态下微生物活性增强,DMPP 降解速度加快,半衰期缩短,硝化作用增强。这与 Carrasco 等^[24]得出 DMPP 抑制效果在冬天更为突出的研究结果相一致。

不同类型的土壤中影响 DMPP 作用效果的因素很复杂,不同的土壤质地、有机质含量、pH、及阳离子交换量等因素均会对 DMPP 的作用效果产生影响,其中土壤质地被认为是影响 DMPP 作用效果的

最主要因素^[26-27]。整个培养过程中,红壤中铵态氮含量始终高于小粉土和青紫泥,硝态氮和亚硝态氮含量低于小粉土和青紫泥。造成上述结果的主要原因是土壤含水量为田间最大持水量的 60% 的同等情况下,红壤透气性较差,随着微生物生长对氧的竞争,红壤中出现了局部性厌氧环境,降低了氨氧化细菌的活性,导致铵态氮含量不断增加,与此同时 DMPP 抑制了铵态氮的氧化,造成铵态氮的积累。这与刘涛等^[7]得出在短期培养中,DMPP 在砂性土中硝化抑制效果较突出的结果相一致。土壤 pH 对 DMPP 作用效果的影响较为复杂,通常情况下 pH 较高的土壤中硝化活性一般较高,这有利于 DMPP 作用效果的发挥,但此时微生物的活性也较高,DMPP 的作用效果又会受到影响^[11]。红壤的 pH 为 4.08,明显低于青紫泥和小粉土,而当土壤 pH 小于 4.5 时自养型硝化细菌受到强烈抑制,此时真菌占据优势地位,硝化作用微弱,铵态氮的氧化受到明显抑制,这也是红壤中铵态氮含量始终高于青紫泥和小粉土的重要原因之一。这与杨云等^[28]认为 pH 在 3.4 ~ 8.6 范围内,随着 pH 升高硝化作用逐渐增强的研究结果相一致。

4 结 论

DMPP 能够明显增加有机无机配施模式土壤中铵态氮含量,延长铵态氮在土壤中停留的时间,使硝态氮长期维持在较低水平,有助于降低硝态氮淋洗的风险。本实验中,有机无机配施模式下 DMPP 的最佳抑制效果在 30 ~ 40 d 之间,有效作用时间可达 60 d。青紫泥土壤中有有机无机配施模式添加 DMPP,淹水处理土壤硝化进程受抑制比湿润处理土壤更显著,高施肥水平有机无机配施模式下 DMPP 的抑制效果更突出。施用环境的温度降低,有利于 DMPP 作用效果的发挥,硝化进程受抑制时间延长。有机无机配施模式下,25 $^{\circ}\text{C}$ 时 DMPP 在红壤中作用时间较青紫泥和小粉土更持久。

参 考 文 献

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1—6. Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plant-soil system and the strategies and techniques for its reduction (In Chinese). Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1—6
- [2] Maeda M, Zhao B Z, Ozaki Y, et al. Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. Environmental Pollution, 2003, 121: 477—487

- [3] Chen X M, Shen Q R, Pan GX, et al. Characteristics of nitrate horizontal transport in a paddy field of the Tai Lake Region, China. *Chemosphere*, 2003, 50: 703—706
- [4] Weiske A, Benckiser G, Herbert T, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide(DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments. *Biology Fertility of Soils*, 2001, 34: 109—117
- [5] Wissemeyer A H, Linzmeier W, Gutser R, et al. The new nitrification inhibitor DMPP-comparisons with DCD in model studies and field applications//Horst W J, Schenk M K, Bürkert A, et al. Plant nutrition-food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 702—703
- [6] Li H, Liang X, Chen Y X, et al Effect of nitrification inhibitor DMPP on nitrogen leaching, nitrifying organisms, and enzyme activities in a rice-oilseed rape cropping system. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 149—155
- [7] 刘涛, 梁永超, 褚贵新, 等. 三种硝化抑制剂在石灰性土壤中的应用效果比较. *土壤*, 2011, 43(5): 758—762. Liu T, Liang Y C, Chu G X, et al. Effect comparison of three different types of nitrification inhibitors (DCD, DMPP and Nitrapyrin) in Calcareous soils (In Chinese). *Soils*, 2011, 43(5): 758—762
- [8] Yu Q G, Chen Y X, Ye X Z, et al. Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns. *Chemosphere*, 2007, 67: 872—878
- [9] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3,4-dimethylpyrazole phosphate: a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34: 79—84
- [10] Irigoyen I, Muro J, Azpilikueta M, et al. Ammonium oxidation kinetics in the presence of nitrification inhibitors DCD and DMPP at various temperatures. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41: 1177—1183
- [11] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1611—1618. Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, et al. Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor: A review (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1611—1618
- [12] Kleineidam K, Košmrlj K, Kublik S, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in rhizosphere and bulk soil. *Chemosphere*, 2011, 84: 182—186
- [13] Zaman M, Sagga S, Blennerhassett J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1270—1280
- [14] 吴成龙, 沈其荣, 张树林, 等. 麦-稻轮作系统有机无机肥料配施协同氮素转化的机制研究 II. 小麦季残留¹⁵N对水稻的有效性分析. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1171—1179. Wu C L, Shen Q R, Zhang S L, et al. Mechanisms for the increased utilization of fertilizer under integrated use of inorganic and organic fertilizers in a winter wheat-rice rotation system II. The availability of residual from winter wheat growing season to succeeding rice (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1171—1179
- [15] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施用有机和无机肥对潮土氮素平衡与去向的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 479—484. Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, et al. Effect of long term fertilizers and organic inputs on balance and fate of nitrogen in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 479—484
- [16] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146—195. Lu R K. *Analytical methods for soil and agricultural chemistry (In Chinese)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 146—195
- [17] 鲍俊丹, 张妹婷, 吴雄平, 等. 13种土壤硝化过程中亚硝酸盐氮的积累与土壤性质的关系. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1952—1958. Bao J D, Zhang M T, Wu X P, et al. Soil nitrite accumulation during nitrification and its relationship with soil properties in thirteen soils of China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1952—1958
- [18] 崔敏, 冉伟, 沈其荣. 水溶性有机质对土壤硝化作用过程的影响. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 45—50. Cui M, Ran W, Shen Q R. Effects of dissolved organic matter on nitrification in soil (In Chinese). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3): 45—50
- [19] Kim D J, Lee D I, Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH. *Biore-source Technology*, 2006, 97: 459—468
- [20] Passioura J B, Wetselaar R. Consequence of banding nitrogen fertilizers in soil II. Effects on the growth of wheat roots. *Plant and Soil*, 1972, 36: 461—473
- [21] Wetselaar R, Passioura J B, Singh B R. Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil I. Effects on nitrification. *Plant and Soil*, 1972, 36: 159—175
- [22] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration. *Water Research*, 2003, 37: 1371—1377
- [23] Shen Q R, Ran W, Cao Z H. Mechanisms of nitrite accumulation occurring in soil nitrification. *Chemosphere*, 2003, 50: 747—753
- [24] Carrasco I, Villar J M. Field evaluation of DMPP as a nitrification inhibitor in the area irrigated by the Canald Urgell (North-east Spain)//Horst W J, Schenk M K, Bürkert A, et al. Plant nutrition-food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 764—765
- [25] 石美, 张妹婷, 沈锋, 等. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其对亚硝酸盐氮积累的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(3): 500—506. Shi M, Zhang M T, Shen F, et al. Effects of nitrification inhibitors on nitrification inhibition and nitrite accumulation in calcareous soil (In Chinese). *Scientia Agri-*

cultura Sinica, 2011, 44(3): 500—506

[26] Barth G, Von Tucher S, Schmidhalter U. Influence of soil parameters on the efficiency of the new nitrification inhibitor DMPP//Horst W J, Schenk M K, Bürkert A, et al. Plant nutrition-food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 756—757

[27] Barth G., Von Tucher S, Schmidhalter U. Effectiveness of 3,4-

dimethylpyrazole phosphate as nitrification inhibitor in soil as influenced by inhibitor concentration, application form, and soil matric potential. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 378—385

[28] 杨云, 黄耀, 姜纪. 土壤理化特性对冬季菜地 N_2O 排放的影响. *农村生态环境*, 2005, 21(2): 7—12. Yang Y, Huang Y, Jiang J. Influence of soil properties on N_2O emission from vegetable soils in winter (In Chinese). *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2): 7—12

EFFECTS OF COMBINED APPLICATION OF ORGANIC AND INORGANIC FERTILIZERS PLUS DMPP ON NITROGEN TRANSFORMATION IN SOILS AS AFFECTED BY DIFFERENT FACTORS

Yin Jianzhen^{1,2} Yu Qiaogang^{1†} Fu Jianrong¹ Ma Junwei¹ Zou Ping¹ Wang Xinxin¹ Fei Jie² Fang Xiaobo²

(1 Institute of Environment Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agriculture Science, Hangzhou 310021, China)

(2 College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Abstract To provide scientific basis for management and efficient utilization of nitrogen in fields, effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) on nitrogen transformation in soils as affected by various factors were studied. For that end, an aerobic thermostat pot experiment was designed to have various affecting factors, like fertilization rate, soil moisture, environmental temperature, soil type, etc., and carried out. After 60 days of incubation, it was found that NH_4^+ -N concentration was 89 times higher and NO_3^- -N concentration 57.8% lower in the pots higher in fertilization rate than in the pots conventional in fertilization rate (no DMPP was added in either pots); in the pots subjected to flooding and combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP, NH_4^+ -N concentration kept on rising and nitrification process was more significantly inhibited; NH_4^+ -N concentration was 56 times higher and NO_3^- -N concentration 18 times lower in the pots incubated under 15°C than in the pots under 25°C, and NH_4^+ -N concentration was 30 and 31 times higher and NO_3^- -N concentration was 44.3% and 66.4% lower in the pots of red soil than in the pots of silt paddy soil and blue clayey paddy soil, respectively. The optimal nitrification inhibitory effect was observed during the period from day 30 to day 40 in the pots of blue clayey paddy soil, silt paddy soil and red soil subjected to combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP under 25°C, and inhibitory effect of the treatment may last throughout the experiment period of 60 days. Obviously the addition of DMPP could increase NH_4^+ -N concentration in the pots subjected to combined application of organic and inorganic fertilizers, and effectively extend residence of the NH_4^+ -N in the soils, and keep NO_3^- -N concentration at a lower level for a longer period. The inhibitory effect of DMPP was more outstanding in the pots subjected to high rates of combined fertilization. Low temperature is benefit to the inhibitory effect of DMPP. It is, therefore, worthwhile to do some further studies on mechanisms of different factors affecting effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus DMPP on nitrogen transformation.

Key words nitrification inhibitor; DMPP; urea; Organic and inorganic fertilizers; nitrogen transformation

(责任编辑:汪叔生)