

硫酸铵与 DMPP 配施对石灰性褐土氮素 转化及 N_2O 、 CO_2 排放的影响

王亚男¹, 闫双堆^{1,2}, 刘 越¹, 曹梦瑶¹, 张乃于¹, 卜玉山^{1,2}

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;

2.山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心,山西 太谷 030801)

摘要:为合理利用工业副产硫酸铵,探究 3,4—二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)配施硫酸铵对石灰性褐土中氮素转化及 N_2O 和 CO_2 排放的影响。通过室内培养试验,研究不同剂量 DMPP 与硫酸铵配施后,石灰性褐土中铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)含量、土壤 pH、 N_2O 和 CO_2 排放通量和累计排放量的动态变化,并进行了相关性分析。结果表明:单施硫酸铵的 ASN 处理在培养的前 15 天硝化作用强烈,第 15 天时,土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降低了 477.28 mg/kg, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增高了 177.03 mg/kg。添加 DMPP 可以明显抑制硫酸铵 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化。培养 30 天后,0.75%~1.75%剂量的 DMPP 处理的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量低于 ASN 处理 174.02~177.00 mg/kg,硝化抑制率为 94.92%~95.30%,且在 0.75%~1.75%浓度范围内未表现出明显的剂量差异效应。各剂量 DMPP 在试验期间的硝化抑制效果表现较好,其作用时长为 30 天以上。培养 30 天时,与空白 CKII 处理相比,单施硫酸铵 T1 处理的 N_2O 和 CO_2 的累计排放量分别显著增加了 975.3%,126.66% ($P < 0.05$),而添加了 DMPP 的 T2 处理相较于单施硫酸铵 T1 处理, N_2O 和 CO_2 累计排放量分别显著降低了 76.8%,6.22% ($P < 0.05$)。相关性分析表明, CO_2 排放通量与 N_2O 排放通量呈正相关关系,土壤 pH 与 N_2O 、 CO_2 排放通量呈负相关关系。硫酸铵与 0.75%DMPP 配合施用在一定程度上可以抑制土壤酸化,同时短期内可以显著降低 N_2O 和 CO_2 累计排放量 ($P < 0.05$)。

关键词: 硫酸铵; 石灰性褐土; 3,4—二甲基吡唑磷酸盐; 氮素转化; N_2O ; CO_2

中图分类号:X511

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0284-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.039

Effects of Ammonium Sulfate Combined with DMPP on Nitrogen Conversion and N_2O , CO_2 Emission in Calcareous Cinnamon Soil

WANG Yanan¹, YAN Shuangdui^{1,2}, LIU Yue¹, CAO Mengyao¹, ZHANG Naiyu¹, BU Yushan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;2.National Experimental

Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to make rational use of ammonium sulfate, we investigated the effects of 3, 4—dimethylpyrazole phosphate (DMPP) combined with ammonium sulfate on nitrogen conversion and N_2O and CO_2 emission in calcareous cinnamon soil. In this study, we analyzed the effects of ammonium sulfate and nitrification inhibitors (DMPP) on ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) content, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) content, N_2O and CO_2 emission flux and cumulative emission in calcareous cinnamon soil by laboratory culture experiments. The correlation analysis of correlative indexes was also carried out. The results showed that ammonium sulfate was highly nitrated in the first 15 days of culture. At the 15th day, the content of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in soil decreased by 477.28 mg/kg, and the content of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ increased by 177.03 mg/kg. Addition of DMPP could significantly inhibit the transformation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of ammonium sulfate to $\text{NO}_3^- - \text{N}$. After 30 days of culture, soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content of 0.75%~1.75% DMPP treatment decreased by 174.02~177.00 mg/kg compared with that of ASN treatment. The nitrification inhibition rate was 94.92%~95.30%, and there was no significant dose effect in the range of 0.75%~1.75% concentration. Each does of DMPP showed better nitrification inhibition effect during the test period, and the duration of action was more than

收稿日期:2020-12-04

资助项目:山西省重点研发计划项目(201803D221003-2)

第一作者:王亚男(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事植物营养施肥与环境影响研究。E-mail:17835422748@163.com

通信作者:闫双堆(1976—),女,副教授,硕士生导师,主要从事土壤生态研究。E-mail:ysdllj@126.com

30 days. When cultured for 30 days, compared with the CK II treatment , the cumulative emissions of N₂O and CO₂ treated with ammonium sulfate alone significantly increased by 975.3% and 126.66%, respectively ($P < 0.05$), while the cumulative emissions of N₂O and CO₂ treated with DMPP significantly decreased by 76.8% and 6.22%, respectively, compared with that treated with ammonium sulfate alone ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that there was a positive correlation between CO₂ emission flux and N₂O emission flux, and a negative correlation between soil pH and N₂O and CO₂ emission flux. In calcareous cinnamon soil, ammonium sulfate combined with 0.75% DMPP could inhibit soil acidification to a certain extent, and at the same time could significantly reduce the cumulative emissions of N₂O and CO₂ ($P < 0.05$).

Keywords: ammonium sulfate; calcareous cinnamon soil; 3, 4—dimethylpyrazole phosphate; nitrogen transformation; N₂O; CO₂

硫酸铵简称硫铵,是我国最早的氮肥品种,由于含氮量(21%)低,生产成本较高,逐渐被其他氮肥品种替代^[1]。然而,近年来随着环保力度加大,含硫尾气治理设施日趋完善,副产品硫酸铵的产量在逐渐增加^[2],目前我国年产能达 1 250 万 t^[1],所以硫酸铵在未来的农业上将具有广阔的应用前景。

硫酸铵是一种生理酸性氮肥,适合石灰性土壤^[3-6],可以同时提供氮源和硫源,但施入土壤易发生硝化作用,从而降低氮肥利用率。3,4—二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)是常用的氮肥增效剂,国内外学者^[7-13]对 DMPP 的应用效果进行了较多研究^[7-12],但多集中在 DMPP 配施尿素等其他氮素肥料,针对硫酸铵配施 DMPP 的硝化抑制效果以及对 N₂O 和 CO₂ 排放之间的关系尚鲜见报道。毛新伟等^[10]研究发现,在毛竹林土壤上,与单施尿素相比,添加 DMPP 处理显著降低了土壤 N₂O 累积排放量;李杰等^[7]以草甸黑土发育的水稻土为研究对象发现,与单施尿素相比,添加 DMPP 的处理显著降低了 N₂O 排放量。鉴于硫酸铵产量逐年增加,为达到环保高效利用工业副产硫酸铵的目的,本文采用室内培养试验,研究了硫酸铵配施不同 DMPP 剂量后对石灰性褐土无机氮含量的动态变化,筛选出与硫酸铵配施的 DMPP 的适宜剂量;同时研究了硫酸铵与适宜剂量的 DMPP 配施对石灰性褐土 N₂O 和 CO₂ 的排放影响,探究了硫酸铵与 DMPP 配施后 N₂O 和 CO₂ 等温室气体排放的指标的相关性,以期为工业副产硫酸铵的资源化及安全利用提供理论依据与支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为石灰性褐土,采自山西农业大学杨家庄附近(112°58'E,37°42'N)的农田土壤,土壤质地为壤土,将采集的新鲜土壤剔除杂物及残留根系后风干,过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性状:pH 8.49,有机质含量

24.36 g/kg,全氮含量 0.21 g/kg,全磷含量 0.99 g/kg,全钾含量 20.18 g/kg,碱解氮含量 37.12 mg/kg,速效磷含量 14.22 mg/kg,速效钾含量 81.34 mg/kg。

供试硝化抑制剂为 3,4—二甲基吡唑磷酸盐 DMPP(3,4—dimethylpyrazole phosphate)市购。供试肥料为硫酸铵(ammonium sulfate,分析纯)。

1.2 试验设计

培养试验于 2019 年 4 月在山西农业大学资源环境学院实验站进行。

1.2.1 硫酸铵配施 DMPP 适宜剂量研究试验设计
试验采用塑料盆(高度×底径×口径,18 cm×10 cm×15 cm),每盆装风干土 1 000 g。硫酸铵用量为 N 0.5 g/kg;DMPP 用量分别为纯氮量的 0 (ASN),0.75% (DP-1),1.00% (DP-2),1.25% (DP-3),1.50% (DP-4)和 1.75% (DP-5)。试验共设 7 个处理,3 次重复(具体方案见表 1)。调节土壤水分田间持水量的 60%,保鲜膜封口后,放到室内培养箱中 25℃预培养 1 周,以恢复土壤的生物学活性。预培养结束后,将硫酸铵与 DMPP 按试验设计与土壤充分混匀,置于 25℃培养箱中恒温黑暗培养。培养期间,采用称重法补水保持土壤水分含量为田间持水量的 60%。在培养开始后的第 2,3,5,7,10,15,25,30 天分别取样,每次均将盆内土壤混匀后取样 30 g 左右,于当天用连续流动分析仪^[7]测定土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量。

表 1 硫酸铵配施不同剂量 DMPP 试验方案

编号	处理	硫酸铵/ (g·kg ⁻¹)	DMPP (纯氮量)/%
1	CKI	0	0
2	ASN	2.36	0
3	DP-1	2.36	0.75
4	DP-2	2.36	1.00
5	DP-3	2.36	1.25
6	DP-4	2.36	1.50
7	DP-5	2.36	1.75

1.2.2 适宜剂量 DMPP 与硫酸铵配施的环境效应研究试验设计 试验设 3 个处理:CKII,空白对照;T1,硫酸铵处理;T2,硫酸铵+0.75%DMPP 处理(前期试验得出的结论)。每个处理 4 次重复。硫酸铵用量为 N 0.5 g/kg 风干土。试验称取 250 g 风干土于 250 mL 的锥形瓶中预培养 1 周,预培养结束后按方案设计将硫酸铵和 DMPP 溶于蒸馏水,均匀添加到相应处理的土壤中,调节瓶内土壤的含水量为田间持水量的 60%。盖橡胶塞以防瓶内水分蒸发损失,将锥形瓶随机排列,放于恒温培养箱中,温度保持在(30±1)℃。后期定期称重以保持土壤含水量不变。试验结束测定土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量及 pH。在培养的第 1,3,6,10,15,20,25,30 天进行气体采集及气相色谱^[7]测定 N₂O 和 CO₂ 浓度。

1.3 测定项目与方法

土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 测定:使用浓度为 2.0 mol/L 的 KCl 溶液按照土水比 1:5 的比例浸提振荡 1 h,用连续流动分析仪测定(法国 AMS Alliance)。

土壤质量含水量测定:称取 2~3 g 左右鲜土于铝盒中,105℃烘干测定。

土壤 pH:pH 计(土水比 1:2.5)测定。

气体采集与测定:气体样品采集分为培养前采样与培养后采样。培养前用注射器采集瓶内空气,采完后,通气 10~20 min,以保证微生物能有充足的氧气进行生命活动,之后关闭三通阀,放入恒温培养箱培养 12 h 后再次采集。每次采完后打开橡皮塞通气 30 min,使锥形瓶瓶内外空气混匀。之后盖塞,保持三通阀打开,放入培养箱,等待下次采样。采集的样品在 24 h 之内用气相色谱(Agilent 7890B)测定 N₂O 和 CO₂ 浓度,并计算其排放通量和排放总量。

1.4 计算公式

硝化抑制率计算公式为:

$$\text{硝化抑制率} = \frac{M - N}{M} \times 100\% \tag{1}$$

式中:M 为不加硝化抑制剂处理的土壤培养前后

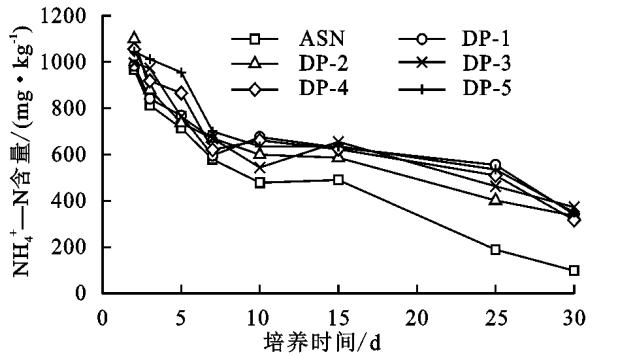


图 1 不同 DMPP 剂量处理的土壤中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量的动态变化

NO₃⁻-N 含量之差(mg/kg);N 为添加硝化抑制剂处理的土壤培养前后 NO₃⁻-N 含量之差(mg/kg)。

土壤表观硝化率计算公式为:

土壤表观硝化率 = $\frac{A}{A+B} \times 100\%$ (2)

式中:A 为 NO₃⁻-N 含量(mg/kg);B 为 NH₄⁺-N 含量(mg/kg)。

排放通量即单位质量土壤单位时间时的气体排放量。计算公式为:

$F = \rho \times V \times \Delta c / (W \times \Delta t) \times T_0 / T$ (3)

式中:F 为 N₂O、CO₂ 排放通量(μg/(kg·h)),mg/(kg·h);V 为瓶内有效空间的体积(L);Δc 为采气前后瓶内 N₂O、CO₂ 气体的浓度差(mg/kg),W 为土样重量(kg);ρ 为标准状况下 N₂O、CO₂ 气体的密度;T₀/T 为玻璃容器内的温度比(绝对温度 K=273/(273+30))。

累计排放量为各培养期间内气体的总排放量,计算公式为:

第 N 次累计排放量 = 前 N 次采样间隔天数 × N 次采样排放通量的平均值 × 24 + 第 N-1 次累计排放量 (4)

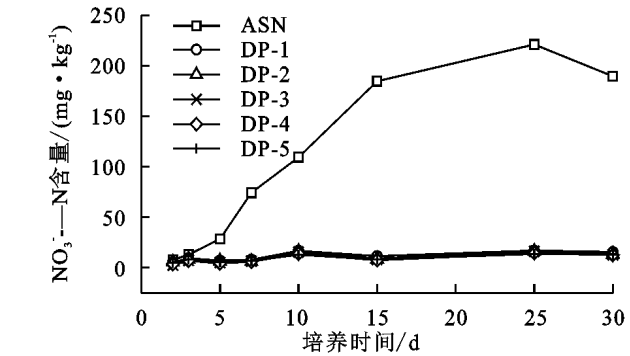
1.5 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,用 LSD 方法(P<0.05)分析处理间差异显著性,采用 Origin 9.1 软件和 R 语言进行绘图。

2 结果与分析

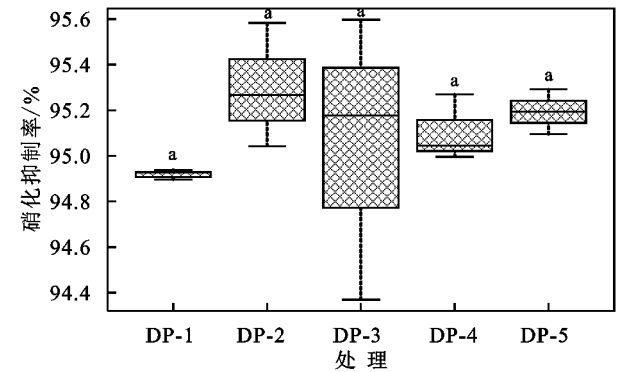
2.1 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的动态变化

精准应用硝化抑制剂可以阻缓 NH₄⁺-N 转化为 NO₃⁻-N 的反应速度,提高氮肥利用率,过量则有造成土壤污染的潜在风险。由图 1 可知,培养 25 天后,单施硫酸铵的 ASN 处理土壤 NO₃⁻-N 含量高达 221.13 mg/kg,为培养第 2 天的 28.76 倍;DMPP 处理的土壤 NO₃⁻-N 含量显著低于 ASN 处理(P<0.05),可以有效抑制土壤的硝化作用,所有 DMPP 处理土壤中 NH₄⁺-N 含量均显著高于 ASN 处理,不同剂量 DMPP 处理之间硝化抑制效果并不显著,建议选择 0.75%DMPP 剂量。



2.2 不同剂量 DMPP 处理对土壤硝化抑制率及土壤表观硝化率的影响

硝化抑制率表示硝化抑制剂对土壤硝化作用抑制的程度。由图 2 可知,DMPP 用量从纯氮的 0.75% 增加到 1.75% 时,其硝化抑制率为 94.92%~95.30%,其各剂量处理的硝化抑制率差异不显著($P<0.05$)。土壤表观硝化率为土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量占土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量的百分量,可以反映土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化作用强度和时间。ASN 处理的土壤的硝化作用强烈,培养结束后其表观硝化率增加到 65.9%。由图 3 可知,DMPP 各剂量土壤表观硝化率均较低,且各剂量间无显著差异($P<0.05$)。



注:框图中——为中位值;—为最大(小)值;图柱上方不同小写字母表示不同处理间显著性($P<0.05$)。下同。

图 2 培养 30 天不同 DMPP 剂量处理对土壤硝化抑制率的影响

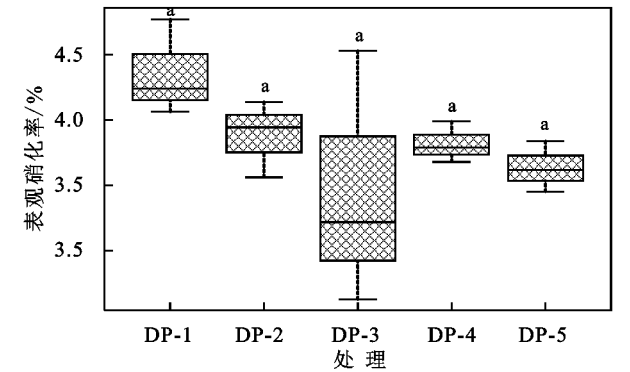


图 3 培养 30 天不同 DMPP 剂量处理的土壤表观硝化率

2.3 不同处理对土壤 pH 的影响

适当降低石灰性土壤的 pH 有助于提高土壤中微

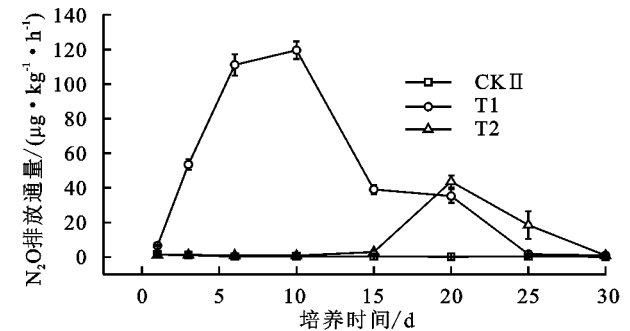


图 4 培养 25 天不同剂量 DMPP 对土壤 pH 的影响

2.4 N₂O 的排放通量和累计排放量的变化特征

由图 5 可知,CKII 处理的 N₂O 排放通量始终处于较低水平,且波动幅度很小。T1 处理在试验期间 N₂O 排放通量始终高于 CKII 处理,呈现先增后降的趋势,并在第 10 天达到排放高峰,排放通量为 119.57 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,是同时期 CKII 处理排放通量 0.3 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 的 402.5 倍,在第 10 天之后排放通量开始减小,25 天后趋于稳定。这表明硫酸铵施入土壤中能快速且大幅地促进土壤 N₂O 的排放,排放速率先快后慢。相较于 T1 处理,T2 处理在培养 30 天内的 N₂O 平均排放通量降低了 80.94%。

培养结束时,T1 处理的 N₂O 累计排放量为 35.01 mg/kg ,比 CKII 处理的 N₂O 累计排放量增加了 975.3%,说明单施硫酸铵能够显著增加 N₂O 的累计排放量。而 T2 处理的 N₂O 累计排放量为 8.1 mg/kg ,较 T1 处理降低了 76.8%,说明硫酸铵配施 DMPP 能有效减少土壤 N₂O 的排放。

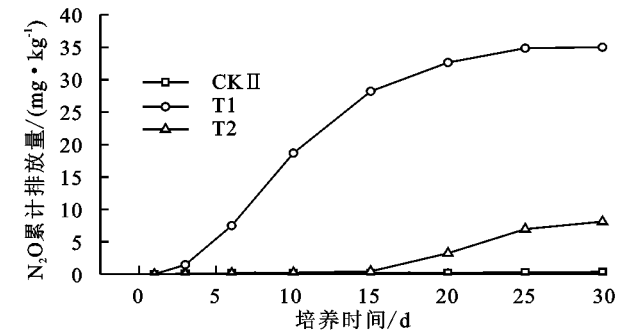


图 5 不同处理下 N₂O 排放通量及累计排放量的动态变化

2.5 CO₂ 的排放通量和累计排放量的变化特征

由图 6 可知,在培养试验期间,T1 处理的 CO₂ 排放通量呈先增后降的趋势,在第 6 天达到最大值,为 31.3 mg/(kg·h),与同时期 CKII 处理的排放通量 9.8 mg/(kg·h)相比增多 220.15%,且在前 25 天内 CO₂ 排放通量均高于 CKII 处理,之后与 CKII 处理趋于相等。T2 处理的排放通量在前 15 天小于 T1 处理,CO₂ 平均排放通量比 CKII 处理减少 15.40%,说

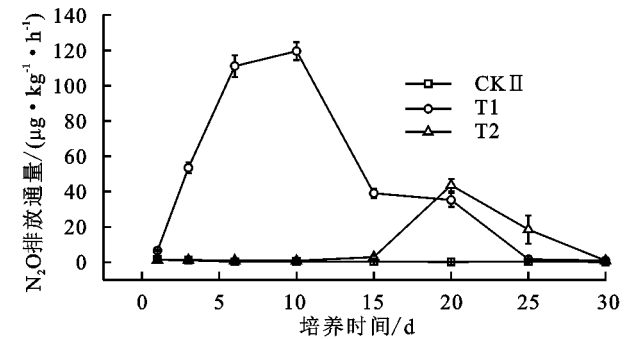
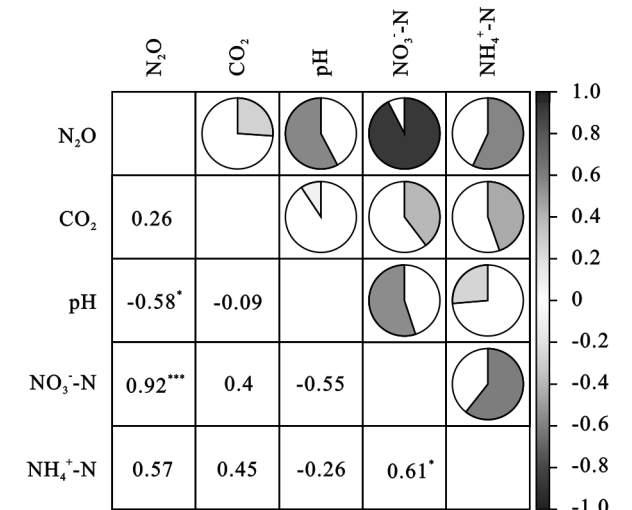


图 6 不同处理下 CO₂ 排放通量及累计排放量的动态变化

2.6 N₂O、CO₂ 排放通量等指标的相关性分析

由图 7 可知,CO₂ 排放通量与 N₂O 排放通量呈正相关关系;pH 与 N₂O、CO₂ 排放通量呈负相关关系,且与 N₂O 排放通量呈显著负相关($P<0.05$);NO₃⁻-N 与 pH 呈负相关关系,与 N₂O、CO₂ 排放通量呈正相关关系,且与 N₂O 排放通量呈极显著正相关($P<0.001$);NH₄⁺-N 与 N₂O、CO₂ 排放通量、NO₃⁻-N 呈正相关关系,且与 NO₃⁻-N 呈显著正相关($P<0.05$),与 pH 呈负相关关系。



注:图中数字表示相关系数;*表示 $P<0.05$;***表示 $P<0.001$;不同灰度表示变量间相关性的强度;圆形的阴影面积大小表示相关性的强弱。

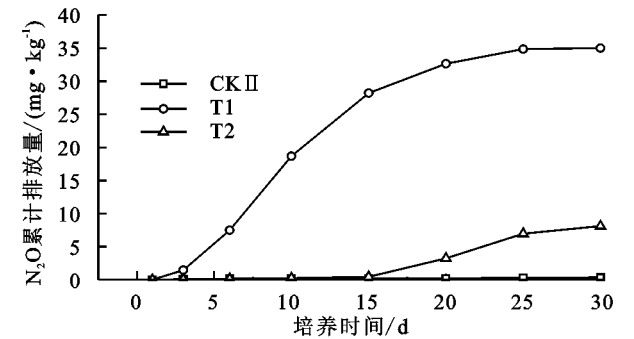
图 7 变量的相关性分析

3 讨论

硫酸铵施入土壤后,在土壤微生物的作用下发生硝化作用,但添加硝化抑制剂后会抑制土壤的硝化作

明硫酸铵配施 DMPP 能降低 CO₂ 的排放通量。T2 处理在 15 天后 CO₂ 排放通量高于 T1 处理。

试验期间,与 CKII 处理相比,T1 处理显著增加土壤的 CO₂ 累计排放量($P<0.05$),增加了 126.66%,说明单施硫酸铵促进了土壤 CO₂ 的排放。与 T1 处理相比,T2 处理的 CO₂ 累计排放量减少了 6.22%,T2 处理在培养 15 天内的 CO₂ 累计排放量几乎与 CKII 相等。说明 DMPP 的添加能够减缓土壤 CO₂ 的释放。



用,使得硫酸铵的 NH₄⁺-N 能在土壤中保存较长时间,同时也改变了土壤中 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 的比例^[10]。有文献^[14]报道,NH₄⁺-N 肥在旱作土壤中 1~2 周后将会转化为 NO₃⁻-N,通过培养试验的 ASN 处理可以明显看出,硫酸铵进入土壤后第 2 天到第 10 天,NO₃⁻-N 的含量从 7.69 mg/kg 迅速增加到 109.38 mg/kg,NH₄⁺-N 含量从 967.11 mg/kg 迅速下降到 478.38 mg/kg。本研究表明,DMPP 能有效抑制土壤中 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化。在本试验中单施硫酸铵的处理在 30 天培养结束后 NO₃⁻-N 含量为 189.58 mg/kg,而各剂量 DMPP 与硫酸铵配施后 NO₃⁻-N 平均含量为 13.42 mg/kg,相比前者减少了 92.92%。这是由于 DMPP 易被土壤胶体和有机质吸附,在土壤中的移动性非常受限,不易与 NH₄⁺ 分离,且其在土壤中的降解速度慢^[14],使得 DMPP 硝化抑制效果稳定,发挥作用时间长。石美等^[15]研究表明,石灰性土壤中施入 DMPP 的抑制效果较为明显,使得硝化过程延滞 35~39 天。本试验中经 DMPP 处理的土壤在培养的 30 天中 NO₃⁻-N 含量一直保持在较低水平。DMPP 在 0.75%~1.75% 浓度范围内,硝化抑制率为 94.92%~95.30%,均保持在较高水平,无明显剂量效应,在 DMPP 为纯氮量的 0.75% 时即可以达到比较好的抑制效果。王雪薇等^[16]研究结果表明,石灰性土壤 DMPP 的剂量还应<1.0%。

石灰性土壤由于土壤中碳酸钙含量高,这个平衡体系使得土壤 pH 维持在 7.6~8.4。已有研究^[17]表明,长期或大量施用氮肥,导致我国农田土壤酸化问题突出,其中以南方地区土壤表现更为严重,北方石

灰性土壤 pH 的降低也较为明显。而添加硝化抑制剂抑制了土壤的硝化作用,可缓解因硝化作用引起的土壤 pH 降低。Cookson 等^[18]研究表明,在单独施用尿素 35 天后,放牧草场土壤 pH 由于硝化作用的进行而显著降低,而尿素和 DCD 配合施用可使土壤 pH 提高约 0.5 个单位。本试验结果表明,CKI 处理的土壤 pH 为 7.60,ASN 处理土壤 pH 为 7.36,相比 CKI 处理降低了 0.24 个单位,而不同剂量的 DMPP 处理的土壤 pH 平均值为 7.67,相比 ASN 处理提高了 0.31 个单位,其原因是在石灰性土壤中 NH₄⁺ 的硝化对土壤 pH 影响最大^[5]。硝化抑制剂的加入会使土壤中较长时间保持较高的 NH₄⁺—N 含量和较低的 NO₃⁻—N 含量^[19]。从土壤化学的角度上说必然可以提高土壤 pH,pH 越高,硝化抑制剂抑制土壤硝化作用表现效果越好。

已有研究^[19]表明,化学氮肥施入土壤中短期内会引起土壤 N₂O 和 CO₂ 释放量的增加。本研究中,单施硫酸铵的 T1 处理和较 CKII 处理显著增加了 N₂O 和 CO₂ 排放通量和累积排放量(图 5 和图 6)。这是由于施用硫酸铵增加了土壤中的有效氮素,为硝化作用和反硝化作用提供底物 NO₃⁻ 和 NH₄⁺,进一步影响到土壤 N₂O 的排放。谢立勇等^[19]研究表明,土壤肥力与土壤 CO₂ 的排放通量有密切关系,推测单施硫酸铵的 T1 处理可能通过影响土壤肥力,进而影响了土壤的呼吸速率,从而使 CO₂ 排放量增加。具体原因有待进一步试验验证。DMPP 对土壤 N₂O、CO₂ 排放的降低效果已经在不同作物和土壤上得到了验证^[20-21]。本研究也证明,与单施硫酸铵的 T1 处理相比,硫酸铵配施 DMPP 的 T2 处理在试验的 30 天内对于 N₂O 和 CO₂ 2 种气体的排放有显著的抑制效果($P<0.05$)。DMPP 能有效减少 N₂O 的排放,是由于 DMPP 延缓了土壤铵态氮向硝态氮的转化过程,进而减少了土壤反硝化作用的底物来源^[22]。DMPP 能够减少 CO₂ 的释放,可能是因为 DMPP 减少了土壤有机碳的矿化而减少了土壤碳的分解^[19]。已有研究^[23-24]表明,CO₂ 通量与 C/N 值、全氮含量呈正相关关系。本研究表明,N₂O 和 CO₂ 的排放具有正相关关系,虽然不具有显著性,原因可能是样本量不够大,但一定程度上可以说明施用硫酸铵改变了土壤的 C/N,进而影响了土壤 CO₂ 的排放。

土壤 pH 可通过影响有机质的合成和分解、微生物的活性而影响 N₂O、CO₂ 的释放^[19]。本研究表明,土壤 pH 与 N₂O 排放通量呈显著负相关($P<0.05$),与 CO₂ 排放通量呈负相关关系。NO₃⁻—N 与 N₂O 排放通量呈极显著正相关($P<0.001$),NH₄⁺—N 与 NO₃⁻—N 呈显著正相关($P<0.05$)。NH₄⁺—N 与

N₂O 排放通量不具有显著的相关关系。从侧面解释了 DMPP 可以在一定时期减少了土壤 N₂O 排放的缘故,是因为 DMPP 可以调节土壤中 NH₄⁺—N 与 NO₃⁻—N 的比例。

由于本研究基于短期的室内培养试验,在各方面还存在一定的局限性,实际应用中,一定比例的 NH₄⁺—N 和 NO₃⁻—N 针对不同作物或不同时期有不同的影响,因此考虑实际条件并结合作物特征对施肥方案进行调控,DMPP 才能发挥其最大的农业效益。

4 结论

(1)硫酸铵施入土壤后在前 15 天发生强烈的硝化作用,而添加 DMPP 处理可显著抑制土壤的硝化作用,减缓 NH₄⁺—N 向 NO₃⁻—N 转化($P<0.05$)。

(2)0.75%~1.75% 的 DMPP 的硝化抑制率为 94.92%~95.30%,且浓度间无明显剂量效应。DMPP 作用时长为 30 天以上。

(3)硫酸铵配施 DMPP 既在一定程度上可以抑制土壤酸化,又能显著降低由于其施入造成的 N₂O 及 CO₂ 的气体排放通量($P<0.05$)。

(4)土壤 pH 与 N₂O、CO₂ 排放通量呈负相关关系,CO₂ 排放通量与 N₂O 排放通量呈正相关关系($P<0.05$)。

参考文献:

- [1] 张卫峰,马林,黄高强,等.中国氮肥发展、贡献和挑战[J].中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [2] Su J Y, Center C N C I. Ammonium sulfate: A nitrogenous fertilizer full of vitality [J].China Chemical Reporter,2010,21(19):46-47.
- [3] Chien S H, Gearhart M M, Villagarcía S. Comparison of ammonium sulfate with other nitrogen and sulfur fertilizers in increasing crop production and minimizing environmental impact: A review [J].Soil Science,2011,176(7):327-335.
- [4] Degryse F, Ajiboye B, Baird R, et al. Availability of fertiliser sulphate and elemental sulphur to canola in two consecutive crops [J].Plant and Soil,2015,398(1):1-13.
- [5] Amanullah, Asif I, Ashraf A, et al. Nitrogen source and rate management improve maize productivity of smallholders under semiarid climates [J].Frontiers in Plant Science,2016,7:1773-1773.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J].Science,2010,327(5968):1008-1010.
- [7] 李杰,石元亮,王玲莉,等.硝化抑制剂对稻田土壤 N₂O 排放和硝化、反硝化菌数量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(12):2095-2101.

(下转第 295 页)

- [18] 穆艳,赵国庆,赵巧巧,等.活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):403-411.
- [19] 王全九,张继红,门旗,等.磁化或电离化微咸水理化特性试验[J].农业工程学报,2016,32(10):60-66.
- [20] 王全九,许紫月,单鱼洋,等.去电子处理微咸水矿化度对土壤水盐运移特征的影响[J].农业工程学报,2018,34(4):125-132.
- [21] 王全九,解江博,张继红,等.磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响[J].农业机械学报,2020,51(2):292-298.
- [22] 和劲松,祁凡雨,裴洛伟,等.磁场处理对液态水缔合结构影响的综合评价指标[J].农业工程学报,2014,30(21):293-300.
- [23] 李言涛,薛永金.水系统的磁化处理技术及其应用[J].工业水处理,2007,27(11):11-15.
- [24] 刘志超,宋稳亚,闫龙飞,等.磁化水溶解度及雾化特性实验研究[J].科学技术与工程,2015,15(19):102-105.
- (上接第 289 页)
- [8] Hong J D, Cameron K C. Inhibition of ammonium oxidation by a liquid formulation of 3,4—Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) compared with a dicyandiamide (DCD) solution in six new Zealand grazed grassland soils [J].Journal of Soils and Sediments,2011,11(6):1032-1039.
- [9] 王静,王允青,张凤芝,等.脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):211-216.
- [10] 毛新伟,程敏,徐秋芳,等.硝化抑制剂对毛竹林土壤 N₂O 排放和氨氧化微生物的影响[J].土壤学报,2016,53(6):1528-1540.
- [11] 赖晶晶,兰婷,王启,等.硝化抑制剂对紫色土硝化作用及 N₂O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1420-1428.
- [12] Pfab H, Palmer I, Buegger F, et al. Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N₂O fluxes from a vegetable cropped loamy soil [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2012,150(3):91-101.
- [13] Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils: A review [J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2015,178(2):171-188.
- [14] 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 and Fertility of Soils,2001,34(2):118-125.
- [15] 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态氮累积的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):500-506.
- [16] 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.
- [17] 张春楠,张瑞芳,王鑫鑫,等.硝化抑制剂和微生物菌剂对甜瓜产量及氮素利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):281-287,293.
- [18] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield[J].Soil Biology and Biochemistry,2002,34(10):1461-1465.
- [19] 谢立勇,叶丹丹,张贺,等.旱地土壤温室气体排放影响因素及减排增汇措施分析[J].中国农业气象,2011,32(4):481-487.
- [20] Kou Y P, Wei K, Chen G X, et al. Effects of 3,4—dimethylpyrazole phosphate and dicyandiamide on nitrous oxide emission in a greenhouse vegetable soil [J].Plant, Soil and Environment,2015,61(1):29-35.
- [21] Gilsanz C, Báez D, Misselbrook T H, et al. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2016,216:1-8.
- [22] 季加敏,喻瑶,陆星,等.肥料添加剂降低 N₂O 排放的效果与机理[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1434-1440.
- [23] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.双氰胺在四川 3 种主要土壤上的硝化抑制作用[J].生态环境学报,2001,10(3):210-213.
- [24] 李明峰,董云社,齐玉春,等.农垦对温带草地生态系统 CO₂、CH₄、N₂O 通量的影响[J].中国农业科学,2004,37(12):1960-1965.