

硝化抑制剂影响小麦产量、 N_2O 与 NH_3 排放的研究^①

孙海军^{1,2}, 闫 炬², 施卫明^{2*}, 祝介贵³

(1 佛山科学技术学院食品科学与工程学院, 广东佛山 528000; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室
(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 临朐县九山镇人民政府, 山东潍坊 262500)

摘 要:通过田间小区试验研究不同施氮水平下,施用硝化抑制剂 CP 对小麦产量、氮素利用率、氧化亚氮(N_2O)排放与氨(NH_3)挥发的综合影响规律。结果表明:在施氮水平为 140 kg/hm^2 与 180 kg/hm^2 时,施用 CP 促使小麦产量分别显著增加 17.8% 和 15.4%,在同一施氮水平下,施用 CP 促进小麦氮素利用率提高 11.3%~25.2%。施用硝化抑制剂 CP 可以降低麦季(特别是基肥与穗肥施用时期)土壤 N_2O 的排放速率,并显著减少 39.3%~53.7% 的累积 N_2O 排放量。但是在两个施氮水平下,施用 CP 导致麦季 NH_3 挥发量增加 1.46~1.75 倍,而且此效应主要发生于基肥与穗肥观测期。本研究说明:在麦季施用硝化抑制剂 CP 可以提高氮素利用率,从而提高小麦产量,并且能减少 N_2O 排放,但同时会导致一定程度的 NH_3 挥发增加,需加以控制。

关键词:氮素利用率;氨挥发;氧化亚氮;施氮量;硝化抑制剂

中图分类号: S143.1+6; S19 **文献标识码:** A

氮素是作物正常生长发育所必需的大量营养元素之一,施用氮肥是保证作物高产的重要措施。但是,氮肥施用过量或管理措施不当等都会导致氮素利用率降低和环境流失风险增加^[1]。根据前人研究报道,施用硝化抑制剂是提高作物氮素吸收利用率、减少损失的有效技术措施之一^[2-6]。前人研究中常用硝化抑制剂有:双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和 2-氯-6-三氯甲基吡啶(CP)等^[2-4]。其作用原理是通过抑制土壤中硝化微生物的铵氧化过程,减少土壤中铵态氮(NH_4^+-N)向硝态氮(NO_3^-N)的生物转化机率,使土壤中 NH_4^+-N 浓度能在较长时间内维持在较高水平,从而促进作物对氮的吸收和微生物固持,减少氮肥环境损失,提高氮素利用效率^[2,5-6]。

但是,已有研究表明硝化抑制剂的施用效果与土壤类型、pH 和温湿度等诸多环境条件显著相关^[7-9]。前人针对硝化抑制剂的研究多是在同一施氮水平下研究其对氮素转化过程的影响^[7,10]或者比较不同硝化抑制剂的施用效果等^[8,11-12]。而对硝化抑制剂的施用效果与施氮水平的关系研究不充分。孙海军等^[4,13]研究表明,硝化抑制剂 CP 应用于水稻的效果与施氮

水平显著相关:即在 CP 施用条件下,稻季施氮量由 240 kg/hm^2 降至 180 kg/hm^2 可以保证水稻高产。在以水稻-小麦为主要轮作制度的太湖地区,麦季的温湿度条件等显著不同于稻季,那么不同施氮量条件下 CP 施用对氮素利用率及小麦产量影响如何?需要进一步评价。已有研究充分表明:施用于麦季土壤的硝化抑制剂能够通过减缓土壤中无机氮的硝化过程,从而有效减少 N_2O 排放^[10,14-15]。与此同时,硝化抑制剂的施用会导致较高的土壤 pH 和 NH_4^+-N 含量^[5-6],这两个因素极有可能导致麦季 NH_3 挥发损失增加。但是,目前尚缺乏田间试验验证,在推广施用硝化抑制剂时,需要综合考虑这一点。此外,已有研究表明,硝化抑制剂对土壤中 NH_4^+-N 的硝化抑制效果随施用时间延长而逐渐降低^[7,16]。那么,在氮肥多以基肥和追肥分次施用的小麦高产体系中,施用硝化抑制剂 CP 在小麦不同生育期(特别是关键施肥期)对 N_2O 排放和 NH_3 挥发的影响规律及发挥作用的关键时期如何,尚不清楚。

为此,本研究拟通过田间小区试验研究在不同施氮量处理下,添加硝化抑制剂 CP 对太湖地区小麦产

基金项目:国家青年科学基金项目(31601832),江苏省青年科学基金项目(BK20160931)和土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y412201425)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介:孙海军(1987—),男,山东潍坊人,博士,高级实验师,主要从事农田氮素循环及其环境效应与面源污染控制研究。

E-mail: ww018150@163.com

量及氮素利用率的影响,及其对麦季 N₂O 排放和 NH₃ 挥发的影响效果及规律,为该地区小麦种植体系中氮素优化管理和减少氮素环境损失提供理论依据与技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

田间小区试验于 2013 年 11 月—2014 年 6 月在江苏省宜兴市丁蜀镇涇渎村开展。该地区为亚热带季风气候,年降雨量为 1 100~1 400 mm,年平均气温为 16 °C 左右。根据国际粮农组织(FAO)土壤分类系统,供试土壤类型为发育于湖积物的滞水潜育人为土,是太湖区域代表性土壤类型。耕层(0~15 cm)土壤基础性质为:全氮 1.56 g/kg,速效氮 120 mg/kg,有效磷 14 mg/kg,速效钾 40 mg/kg,有机质 22.7 g/kg,pH(H₂O) 6.25。

本研究用硝化抑制剂的有效成分为 2-氯-6-三氯甲基吡啶(N-serve, CP),在乳液成品中含量为 24%,由浙江奥复托化工有限公司提供成品。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设置 5 个处理,分别为:①CK,无氮肥对照;②N140,施氮 140 kg/hm²;③N140+CP,施氮 140 kg/hm²,配施 CP;④N180,施氮 180 kg/hm²;⑤N180+CP,施氮 180 kg/hm²,配施 CP。每处理 3 次重复,共计 15 个小区(5 m×6 m)。本研究中氮肥分 3 次施用:30% 作为基肥,30% 作为分蘖肥,40% 作为孕穗肥,施用时间分别为 2013 年 11 月 23 日,2014 年 1 月 14 日和 3 月 14 日。CP 在 3 次施用氮肥时,按照有效成分为尿素质量 0.25% 的比例均匀喷于尿素颗粒表面施用。各处理施用等量磷、钾肥,施用量分别为 60 kg/hm²(以 P₂O₅ 计)和 90 kg/hm²(以 K₂O 计),磷、钾肥均作为基肥一次施用。在上季作物水稻收获后翻耕土壤,同时施用基肥,然后播种小麦,同步开始相关测试项目。小麦季试验期间水、肥、药等管理措施均同当地农户,小麦于 2014 年 6 月 5 日收获。

1.2.2 样品采集及测定 1)小麦产量与氮素利用率的测定。小麦成熟后,去除距离小区田埂 1 m 范围内植株以减少边际效应干扰,采集每小区有效面积(4 m×5 m)内所有小麦地上部分,晒干称重,记录小麦生物量。然后,剪取小麦穗部,脱粒,称重,记录小麦产量。小麦氮素利用率(NUE, %)=(施氮处理小麦总吸收氮量-不施氮处理小麦总吸收氮量)/麦季氮素投入量×100。小麦植株全氮量采用硫酸消解-凯氏定

氮法测试。

2)麦季 N₂O 排放与 NH₃ 挥发量的测定。麦季 N₂O 采集与检测采用静态箱-气相色谱法^[4]。静态箱尺寸为内径 25 cm,高 100 cm。取样时将其置于水槽底座中形成一密闭空间,然后在密闭 15、30 和 45 min 时分别采集箱内气体样品,用气相色谱(Agilent 7890A)分析其中 N₂O 浓度。通过以下公式计算 N₂O 排放通量:

$$F = \rho \times h \times \Delta c / \Delta t \times 273 / T$$

式中:F 为 N₂O 排放通量(μg/(m²·h)),ρ 为标准状况下 N₂O 气体密度(1.25 kg/m³),h 为静态箱高度,Δc/Δt 为静态箱内气体浓度随时间的变化率(μg/(L·h)),T 为采气箱内绝对温度。在每次施肥后的第 2、4、6、8 天加密采集气体样品,平时观测周期内每 10~12 d 采集一次气体样品。采用积分法计算麦季累积 N₂O 排放量。

麦季 NH₃ 挥发量观测采用连续动力抽气-密闭室法^[4]。本研究中用于测定 NH₃ 挥发的密闭室尺寸为内径 15 cm、高 20 cm 的透明有机玻璃罩;所用吸收液为 2% 浓度的硼酸溶液,每 1 L 吸收液加 20 ml 甲基红/溴甲酚绿混合指示剂,滴定用标准硫酸浓度为 0.098 5 mol/L。NH₃ 挥发测定于每次施氮肥后立即开始,于每日上午 8:00—10:00 与下午 14:00—16:00 进行。在观测过程中发现,由于麦季温度较低、降雨频发,导致土壤水分含量高等原因,每日 NH₃ 挥发量不高。如果选择每日滴定,会造成较大操作误差,为避免此问题,本研究在施肥后连续 10 d 抽气,在监测结束时集中滴定,计为当次施肥后 NH₃ 挥发损失总量。

1.2.3 数据分析 采用 Excel 2007 办公软件对数据进行基础统计与分析。各处理之间差异性比较采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和 Duncan 多重比较方法(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 小麦产量与氮素利用率

表 1 数据表明,本研究中小麦产量为 2.51~6.28 t/hm²,施用氮肥显著增加小麦产量,4 个施氮处理的小麦产量为对照处理的 1.77~2.50 倍,且小麦产量随施氮水平的提高显著增加(P<0.05)。其中,N180 处理比 N140 处理产量高 22.2%,N180+CP 处理比 N140+CP 处理产量高 19.8%。试验结果同时表明:在不同施氮水平下,施用硝化抑制剂 CP 均可以显著提高小麦产量(P<0.05),其中 N140+CP 处理比 N140 处

理小麦产量高 17.8%，而且能够达到 180 kg/hm² 施氮处理的产量水平；在 180 kg/hm² 施氮水平下，CP 施用可显著提高小麦产量 15.4% ($P < 0.05$)。

从表 1 结果还可知，不同施氮处理下小麦氮素吸收利用率为 22.6% ~ 33.5%，在本研究中，随着施氮水平的提高，小麦氮素利用率显著升高。其中，N180 处理和 N180+CP 处理的氮素利用率分别比 N140 和 N140+CP 处理高 22.2% 和 19.8%。这可能与高施氮水平下小麦生物量大，因此能够吸收更高量的氮有直接关系。结果同时表明，在同一施氮水平下，添加硝化抑制剂 CP 的处理中小麦的氮素利用率均有所提高。其中，当施氮水平为 140 kg/hm² 时，CP 施用下小麦氮素利用率显著提高 25.2% ($P < 0.05$)，当施氮量增加至 180 kg/hm² 时，CP 施用仍可使氮素利用率提高 11.3%，但未达到统计学的显著水平 ($P < 0.05$)。

表 1 不同施氮水平下施用 CP 对小麦产量和氮素利用率的影响

Table 1 Effects of CP application on wheat grain yields and N usage efficiency under two N application rates

处理	小麦产量(t/hm ²)	氮素利用率(%)
CK	2.51 ± 0.26 d	—
N140	4.45 ± 0.13 c	22.6 ± 1.8 c
N140+CP	5.24 ± 0.28 b	28.3 ± 2.3 b
N180	5.44 ± 0.31 ab	30.1 ± 2.3 ab
N180+CP	6.28 ± 0.45 a	33.5 ± 3.0 a

2.2 麦季 N₂O 排放动态变化和累计排放量

在小麦生长周期内，均可以监测到一定量的 N₂O 排放(图 1)。由图 1 可知，麦季各处理 N₂O 的排放峰值主要出现在基肥和穗肥施用后的 1 ~ 15 d。另外，在穗肥施用前，由于气候温度的升高和降雨导致的水分剧烈变化等原因，也监测到 N₂O 排放峰值。在 N₂O 排放高峰期，施用硝化抑制剂 CP 能够显著降低 N₂O 排放速率 ($P < 0.05$)。比如：基肥和穗肥施用后，N140 处理的 4 次连续观测的 N₂O 平均排放速率分别为 204.7 μg/(m²·h) 和 154.4 μg/(m²·h)，N140+CP 处理分别降至 126.6 μg/(m²·h) 和 79.2 μg/(m²·h)；而在 180 kg/hm² 施氮水平下，两个施肥阶段的 N₂O 平均排放速率分别由 N180 处理的 283.9 μg/(m²·h) 和 226.7 μg/(m²·h) 降至 N180+CP 处理的 142.2 μg/(m²·h) 和 83.4 μg/(m²·h)。

从图 2 结果可知，施氮处理下麦季 N₂O 排放总量为 2.26 ~ 5.77 kg/hm²，占麦季氮素投入量的 1.01% ~ 2.73%。在不施用硝化抑制剂 CP 的情况下，当施氮量由 140 kg/hm² 增加至 180 kg/hm² 时，N₂O 排放总量显著增加 54.8% ($P < 0.05$)。施用硝化抑制剂 CP 后，

此增加效应减弱：N180+CP 处理仅比 N140+CP 处理的 N₂O 排放总量高 18.1%，且差异未达显著水平 ($P < 0.05$)。更有意义的是：在 140 kg/hm² 和 180 kg/hm² 施氮水平下，施用 CP 均能够显著降低两个施氮水平处理下的麦季 N₂O 排放总量，降低比例分别为 39.3% 和 53.7% ($P < 0.05$)。

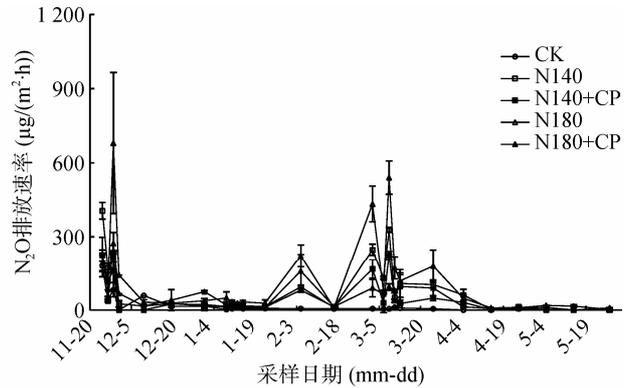


图 1 不同处理下麦季 N₂O 排放速率的动态变化

Fig. 1 Changes of N₂O emission rates during wheat growth season under different treatments

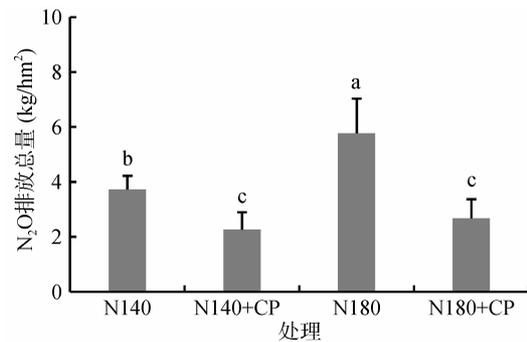


图 2 不同施氮水平下施用 CP 对麦季累计 N₂O 排放的影响(CK 处理麦季累计 N₂O 排放量为 0.85 ± 0.26 kg/hm²)

Fig. 2 Effects of CP application on seasonal cumulative N₂O emissions under two N application rates

2.3 麦季 NH₃ 挥发量

本研究中，施氮处理麦季累计 NH₃ 挥发量为 2.01 ~ 7.31 kg/hm²，占氮素投入量的 0.64% ~ 3.56%，且不同处理之间 NH₃ 挥发排放量差异显著 ($P < 0.05$)。表 2 数据说明，施氮量增加会导致 NH₃ 挥发损失显著增加 ($P < 0.05$)，该效应存在于 3 次施肥观测期，且在硝化抑制剂施用条件下亦如此(表 2)。试验结果同时说明，施用硝化抑制剂 CP 导致麦季累计 NH₃ 挥发量显著增加。在 140 kg/hm² 与 180 kg/hm² 施氮水平下，施用 CP 导致麦季不同施肥阶段 NH₃ 挥发量分别增加 39.1% ~ 78.8% 和 10.8% ~ 64.7%；同时导致施用 CP 处理下 NH₃ 挥发累计排放量是等氮量投入下未施用 CP 处理的 1.75 倍和 1.46 倍，此效应主要发生于基肥

和穗肥施用时期(表 2), 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 2 施用 CP 硝化抑制剂对小麦不同施肥
观测期 NH₃ 挥发量的影响

Table 2 Effects of CP application on NH₃ volatilization under different fertilization stages in wheat season

处理	NH ₃ 挥发排放量 (kg/hm ²)			
	基肥	蘖肥	穗肥	累计量
N140	0.20 ± 0.08 b	1.15 ± 0.24 b	0.66 ± 0.17 d	2.01 ± 0.24 d
N140+CP	0.34 ± 0.03 a	1.60 ± 0.41 ab	1.18 ± 0.37 c	3.51 ± 0.36 c
N180	0.29 ± 0.06 b	1.67 ± 0.14 ab	3.06 ± 0.30 b	5.02 ± 0.17 b
N180+CP	0.42 ± 0.10 a	1.85 ± 0.21 a	5.04 ± 1.30 a	7.31 ± 1.18 a

注: CK 处理麦季累计 NH₃ 挥发量为 1.11 ± 0.06 kg/hm²。

3 讨论

本研究中氮肥施用量增加促进小麦产量提升, 而且施用硝化抑制剂 CP 具有显著的增产效果, 当施氮量为 140 kg/hm² 和 180 kg/hm² 时, CP 施用可分别促进小麦增产 17.8% 和 15.4%。同时, 本研究结果表明小麦氮素利用率在施用 CP 条件下提高 11.3% ~ 25.2%(表 1)。因此, 施用硝化抑制剂促进小麦产量提升的主要原因之一是 CP 增加小麦对氮的吸收, 提高氮素利用效率。与本研究结果一致, 刘欢等^[17]发现在 195 kg/hm² 施氮水平上, 配施抑制剂处理可使小麦增产 9.0% ~ 24.6%。另有学者报道, 几种常见硝化抑制剂(如 DCD、DMPP 等)用于小麦生产均具有增产效果^[11-12, 18]。而华建峰等^[8]研究表明, 硝化抑制剂处理的春小麦产量没有明显提升, 主要原因是其研究中抑制剂处理小麦的倒伏问题影响了产量, 这与其设定施氮量偏高(底肥施氮量即高达 105 kg/hm²)有关系。本课题前期研究工作发现, 在施用硝化抑制剂条件下可将施氮量由 240 kg/hm² 降至 180 kg/hm², 能够保证水稻高产^[4]。在本研究中, 两个施氮水平下施用 CP 均增加小麦产量, 那么在该区域小麦种植体系下继续增加施氮量, CP 施用是否仍有增产效果? 仍需要进一步研究。由此可见, 今后需要寻找一个相对适宜施氮量: 在该施氮量下, 既能保证小麦高产, 而且氮素利用率高, 环境损失少。

施用氮肥是土壤产生 N₂O 的主要因素。本研究中氮肥施用量增加导致土壤 N₂O 排放通量显著提高。根据前人报道, 旱作系统中硝化抑制剂处理能减少氨氧化细菌的群落数量, 降低硝化速率, 使土壤中 NH₄⁺-N 在较长时间内维持在一个较高水平, 而使 NO₃⁻-N 处于较低水平, 发挥抑制硝化过程的作用^[7]。而且,

施用硝化抑制剂会增加土壤微生物对氮的固持, 从而减少 N₂O 排放^[9]。本研究结果亦表明, 施用硝化抑制剂 CP 可以显著降低不同施氮水平处理下麦季 N₂O 累积排放量。在 140 kg/hm² 和 180 kg/hm² 施氮水平下, 施用 CP 分别降低 N₂O 排放 39.3% 和 53.7%。特别是在基肥与穗肥施用后观测周期内, CP 施用能够显著降低 N₂O 排放速率(图 1), 从而减少整个小麦生长季的累积 N₂O 排放量。与本研究结论相一致, Bhatia 等^[10]报道, 施用硝化抑制剂可减少麦季由于 N₂O 排放导致的温室效应 13.5% ~ 19.5%。本研究中, 硝化抑制剂分次与氮肥同时施用, 减排 N₂O 效果更明显。同时有研究表明, 施用 DCD 能显著降低菜地土壤 N₂O 排放速率和排放总量^[19-20]。这说明, 相较于常规尿素处理, 硝化抑制剂 CP 施用确实能够抑制氮素从 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化, 从而减少 N₂O 排放, 在不同种植体系中温室气体减排方面均表现出良好效果。

容易理解, 当施氮水平由 140 kg/hm² 增加至 180 kg/hm² 时, 麦季 NH₃ 挥发量显著增加, 占氮素投入量的比例也随之增加。根据前人报道, 硝化抑制剂在与铵态氮肥或者尿素配合施用, 受土壤环境和自身特性等综合因素的影响, 在抑制土壤中氮素硝化-反硝化过程的同时有加剧 NH₃ 挥发的潜在几率^[7, 21-22]。本研究表明, 在 140 kg/hm² 和 180 kg/hm² 施氮水平下, 施用硝化抑制剂 CP 导致 NH₃ 挥发量分别增加 74.6% 和 45.6%。与本研究结果一致, 前人在菜园土研究结果表明, 硝化抑制剂 DCD 施用显著增加 NH₃ 挥发损失^[23]。而且, Zaman 等^[24]报道, 硝化抑制剂 DCD 的施用, 在春、秋季分别增加 15.6% 和 39.0% 的牧地土壤 NH₃ 挥发。在本研究中发现, 施用 CP 减少 N₂O 排放效果显著的基肥和穗肥观测周期内, 也是其增加 NH₃ 排放的两个关键时期。可见, 硝化抑制剂在成功抑制麦季土壤 NH₄⁺-N 硝化作用的同时, 也加剧了其通过 NH₃ 挥发损失的风险。而且, 根据前人研究报道, 添加硝化抑制剂 DCD 处理的土壤 pH 一直处于较高水平, NH₃ 挥发强度与土壤 pH 同步, 导致 DCD 处理土壤 NH₃ 挥发量高达对照处理的 523.0% ~ 575.8%^[23]。尿素氮施入土壤后, 其水解过程可使土壤 pH 暂时升高, 随着硝化作用的进行, 土壤 pH 又呈下降趋势^[23]。而硝化抑制剂恰好可以抑制硝化作用, 使土壤在更长的时间内保持较高的 NH₄⁺-N 含量和 pH, 这两个因素导致 NH₃ 挥发在一定程度上增加。不过, 本研究中 NH₃ 挥发损失绝对量为 2.01 ~ 7.31 kg/hm², 仅占当季尿素氮投入量的 0.64% ~ 3.56% (表 2), 处于

一个较低水平,而且在应用硝化抑制剂时,联合其他措施(如添加脲酶抑制剂、浮萍接种等)可以控制 NH_3 挥发^[8, 26-27]。因此,施用硝化抑制剂 CP 对太湖地区小麦种植仍然是一较有利选择。

4 结论

1) 在 140 kg/hm^2 和 180 kg/hm^2 施氮量处理下,施用硝化抑制剂 CP 可以提高小麦氮素利用率 11.3% ~ 25.2%,并增加小麦产量 15.4% ~ 17.8%。同时,施用硝化抑制剂 CP 能有效减少 39.3% ~ 53.7% 的麦季土壤 N_2O 排放。

2) 施用 CP 导致麦季氮素 NH_3 挥发量增加 1.46 ~ 1.75 倍,但 NH_3 损失绝对量较低,仅为 2.01 ~ 7.31 kg/hm^2 (占当季投入氮的 0.64% ~ 3.56%),在生产实践中可以有效控制。

3) 综合考虑对氮素利用率与小麦产量, N_2O 排放及 NH_3 挥发的影响,施用 CP 是一种较有利选择。

参考文献:

- [1] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261
- [2] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077-2083.
- [3] 刘生辉, 吴萌, 胡锋, 等. 添加硝化抑制剂 DMPP 对红壤水稻土硝化作用及微生物群落功能多样性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(2): 349-355
- [4] Sun H J, Zhang H L, Powlson D, et al. Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine[J]. Field Crops Research, 2015, 173: 1-7
- [5] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1389-1395
- [6] Fisk L M, Maccarone L D, Barton L, et al. Nitrapyrin decreased nitrification of nitrogen released from soil organic matter but no *amoA* gene abundance at high soil temperature[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 88: 214-223
- [7] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1903-1906
- [8] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 94-99
- [9] 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
- [10] Bhatia A, Sasmal S, Jain N, et al. Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 136: 247-253
- [11] 潘复燕, 薛利红, 卢萍, 等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 928-936
- [12] 王雅楣. 几种硝化抑制剂对土壤氮素转化和小麦生长的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014
- [13] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氮挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027-1033
- [14] Malla G, Bhatia A, Pathak H, et al. Mitigating nitrous oxide and methane emissions from soil in rice-wheat system of the Indo-Gangetic plain with nitrification and urease inhibitors[J]. Chemosphere, 2005, 58: 141-147
- [15] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 等. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 254-262
- [16] Banerjee B, Pathak H, Aggarwal PK. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36(3): 207-214
- [17] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮肥利用及农田氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 232-238
- [18] 许靖. 脲酶/硝化抑制剂对麦田土壤氮素转化及小麦氮素利用的影响[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2011
- [19] 邱玮红, 刘金山, 胡承孝, 等. 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3188-3192
- [20] 熊舞, 夏永秋, 周伟, 等. 菜地氮肥用量与 N_2O 排放的关系及硝化抑制剂效果[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 743-751
- [21] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 917-924
- [22] 俞巧刚, 符建荣. 含 DMPP 抑制剂尿素的氮挥发特性及阻控对策研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 744-748
- [23] 皮荷杰, 曾清如, 蒋朝辉, 等. 两种硝化抑制剂对不同土壤中氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 68-72
- [24] Zaman M, Zaman S, Nguyen M L, et al. The effect of urease and nitrification inhibitors on ammonia and nitrous oxide emissions from simulated urine patches in pastoral system: A two-year study[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465: 97-106
- [25] 商照聪, 高子勤. 双氰胺对碳酸氢铵在土壤中氮素转化的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 183-185
- [26] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氮挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411-1419
- [27] Sun H J, Zhang H L, Min J, et al. Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affected ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater[J]. Paddy and Water Environment, 2016, 14(1): 105-111

Effects of Nitrification Inhibitor Application on Wheat Grain Yield, N₂O Emission and NH₃ Volatilization

SUN Haijun^{1,2}, MIN Ju², SHI Weiming^{2*}, ZHU Jiegui³

(1 School of Food Science and Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 People's Government of Jiushan Town, Weifang, Shandong 262500, China)

Abstract: A field pilot-scale experiment was conducted to evaluate the comprehensive effects of nitrification inhibitor CP application on wheat grain yield, nitrogen usage efficiency (NUE), nitrous oxide (N₂O) emission and ammonia (NH₃) volatilization from soil under different N applied rates. Results showed that CP application significantly increased wheat grain yield by 17.8% and 15.4% when N applied rates were 140 kg/hm² and 180 kg/hm², respectively. Furthermore, the NUE of wheat was increased by 11.3%—25.2% under CP added treatments. The application of CP decreased N₂O emission rates (especially during the observed periods after basal and earing fertilizers applied) and thereby reduced wheat seasonal cumulative N₂O emissions by 39.3%—53.7%. However, the total NH₃ volatilization of wheat season observed under CP added treatments were 1.46—1.75 folds of that observed under their counter treatments without CP, which were mainly observed during the monitoring periods of basal and earing fertilization. We conclude that the CP application can promote the NUE of wheat, thereby enhance wheat grain yield, and reduce N₂O emission, whereas lead to higher NH₃ losses at a certain degree, thus should be controlled.

Key words: Nitrogen usage efficiency; Ammonia volatilization; Nitrous oxide; Nitrogen application rates; Nitrification inhibitor