

交替滴灌配施硝化抑制剂对夏玉米 土壤氨挥发和土壤酶活性的影响

杨乐^{1,2}, 曹辉¹, 付媛媛¹, 张莹莹¹, 高阳^{1*}, 刘战东¹

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100082)

摘要:【目的】寻求灌水方式和施加硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸 (DMPP) 对施肥后夏玉米田土壤氨挥发影响和土壤氮素转化过程的关键驱动因子。【方法】采用通气法, 设置常规浅埋滴灌施加 DMPP (DI+DMPP)、浅埋交替滴灌施加 DMPP (ADI+DMPP)、常规浅埋滴灌不施加 DMPP (DI+NO)、浅埋交替滴灌不施加 DMPP (ADI+NO) 共 4 个处理, 研究灌水方式与添加硝化抑制剂对玉米生育期内氨挥发速率、氨挥发累积量和土壤酶活性的影响。【结果】①在玉米不同生育阶段, 灌水方式和施加 DMPP 对氨挥发速率的影响不同, 其中, 施加 DMPP 可显著提高拔节期、抽雄期、灌浆期的土壤氨挥发速率; 交替滴灌只对大喇叭口期的土壤氨挥发速率有显著降低作用。②交替滴灌较常规滴灌显著降低了 12.70%~45.45% 的氨挥发累积量, 然而, 施加 DMPP 处理对玉米土壤氨挥发累积量有显著促进作用。【结论】交替滴灌灌水而不施加硝化抑制剂 DMPP 的组合处理 (ADI+NO) 在氨挥发减排方面效果最优。

关键词: 玉米; 交替滴灌; 硝化抑制剂; 氨挥发

中图分类号: S274; S145

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022443

OSID:



杨乐, 曹辉, 付媛媛, 等. 交替滴灌配施硝化抑制剂对夏玉米土壤氨挥发和土壤酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 38-44.

YANG Le, CAO Hui, FU Yuanyuan, et al. Effect of Alternative Drip Irrigation and Nitrification Inhibitors on Ammonia Volatilization and Soil Enzymatic Activity in a Summer Maize Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 38-44.

0 引言

【研究意义】玉米是中国第一大粮食作物, 2021 年中国玉米播种面积为 4 332 万 hm^2 , 总产量 2.725 亿 t, 其稳产和高产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。2002—2021 年, 中国玉米单位面积产量约增加了 1 倍^[2], 其中, 氮肥的大量施用在玉米产量提升中起关键作用。然而, 过度施用氮肥也是玉米生产过程中普遍存在的问题。氮肥的不合理施用导致氮肥利用率偏低, 氮肥利用率仅为 30%~40%^[3], 这也导致施氮量持续增加, 并产生严重的环境问题。如何在丰产的前提下, 减少氮肥用量并提高氮肥利用率是当前农业绿色生产亟待解决的关键问题。【研究进展】氨挥发是农业氮素流失的重要部分, 约占总氮素流失的 11%^[4]。刘阳阳等^[5]、李然等^[6]、张英鹏等^[7]研究表明, 制定科学合理的水氮管理制度对氨挥发有明显的抑制作用。交替灌溉是一种通过调控作物生理生化过程进而实现生物节水的灌溉技术,

可在不减产条件下有效提高氮素利用效率、减少氨挥发损失^[8]。雷杨莉等^[9]研究表明, 在适宜的水氮配比条件下, 交替灌溉使夏玉米农田土壤氨挥发量显著降低了 39.4%~77.5%。韩坤等^[8]在陕西杨凌对夏玉米进行的交替灌溉水氮耦合试验发现, 与常规均匀灌溉相比, 交替灌溉处理的土壤氨挥发量降低了 13.04%~75.55%, 而玉米产量并未显著降低。硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸 (DMPP) 可抑制硝化-反硝化作用, 可延长铵态氮存在时间, 促使土壤与植物供需氮素同步, 在提高氮素利用效率方面被广泛使用^[10-11]。Qiao 等^[12]、Lam 等^[13]、高珊等^[14]研究表明配施硝化抑制剂对氨挥发有促进作用, 然而, Freney 等^[15]、De 等^[16]研究显示, 受土壤铵态氮量和温度、pH 值等环境因素的影响, 硝化抑制剂对氨挥发累积排放量并无显著作用。【切入点】因此, 采用交替灌溉并配施硝化抑制剂 DMPP 对农田土壤氨挥发损失特征的影响及土壤氮素转化过程中的关键驱动因子还需要进一步探讨。【拟解决的关键问题】为此, 在防雨棚下开展控制试验, 采用通气法测定土壤氨挥发, 分析交替滴灌配施 DMPP 对氨挥发速率、氨挥发累积量和土壤酶活性的影响, 研究结果可为玉米绿色高效的灌溉施肥技术构建提供科学依据。

收稿日期: 2022-08-09

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-02); 中国农业科学院科技创新工程项目 (ASTIP)

作者简介: 杨乐 (1999-), 女。硕士研究生, 主要从事非充分灌溉研究。
E-mail: Leyang625@163.com

通信作者: 高阳 (1978-), 男。研究员, 主要从事作物与水分关系研究。
E-mail: gaoyang@caas.cn

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 6—10 月于大型启闭式防雨棚下的测坑进行。研究区地处暖温带大陆性季风气候区，年平均气温 14℃，年日照时间 2 399 h，年平均降水量 582 mm。2021 年夏玉米生育期内的气温和降水如图 1 所示。测坑面积为 6.6 m²（长 3 m、宽 2.2 m），土壤为砂壤土，土体深度为 2.0 m，体积质量为 1.51 g/cm³，田间持水率为 31.1%（体积含水率）。0~100 cm 土层的平均土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾质量分数分别为 7.8 g/kg、21.62 mg/kg、4.96 mg/kg、79.24 mg/kg。

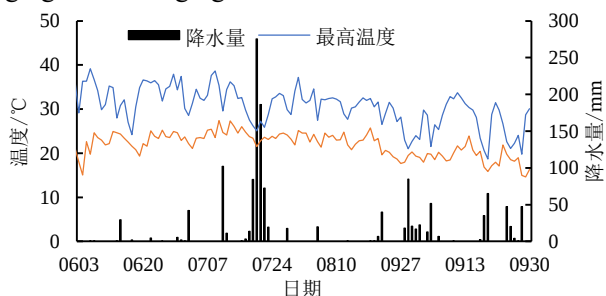


图 1 2021 年夏玉米生育期的气温与降水量变化

Fig.1 Changes of temperature and rainfall during the growth period of summer maize in 2021

1.2 试验设计

试验采用二因素二水平完全随机设计，分别为 ①灌溉方式：常规浅埋滴灌（DI）和交替滴灌（ADI），②施用硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸（DMPP）（1%纯 N 量）和不施加 DMPP。试验设置常规浅埋滴灌施加 DMPP（DI+DMPP）、浅埋交替滴灌施加 DMPP（ADI+DMPP）、常规浅埋滴灌不施加 DMPP（DI+NO）、浅埋交替滴灌不施加 DMPP（ADI+NO）共 4 个处理，每个处理 3 次重复，共计 12 个小区。滴灌带间距 50 cm，滴头流量 2.2 L/h，滴头间距 20 cm，滴灌带浅埋深度 3 cm。每个测坑布设 5 条滴灌带（图 2），交替滴灌时，滴灌带按单数顺序为第 1 组，双数为第 2 组，每次灌水只开 1 组，2 组交替灌水；为保证每组滴灌带的灌水量一致，滴灌带 5 不灌水。为避免测坑边际的影响，取样均在测坑中间 2 条滴灌带附近进行。

玉米品种为“登海 605”，种植密度为 67 500 株/hm²（行距 50 cm，株距 30 cm）。前茬作物为冬小麦，玉米于 6 月 11 日播种，依据土壤质地和播种后土壤含水率^[17]，灌出苗水 0.2 m³，生育期内灌水时间确定通过获取每日气象数据计算参考作物需水量 ET_0 ，当作物实际需水量（ $ET_c = K_c \times ET_0$ ）达到 36 mm 时灌水，灌水为 36 mm。采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 ^[18]， K_c 参照新乡多年总结作物

系数。玉米生育期的施氮量为 200 kg/hm²，其中基施 30%氮肥，剩余 70%的氮肥分别在拔节期（35 kg/hm²）、大喇叭口期（35 kg/hm²）、抽雄期（35 kg/hm²）、灌浆期（35 kg/hm²）施入。磷肥（P₂O₅）105 kg/hm²和钾肥（K₂O）105 kg/hm²均作为基肥施入。

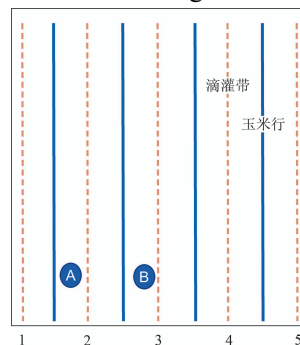


图 2 测坑夏玉米交替滴灌示意图

Fig.2 Schematic diagram of alternate drip-irrigation of summer maize in lysimeter

1.3 观测项目与方法

1.3.1 土壤氮挥发量

采用通气法^[19]测量土壤氮挥发量，具体步骤为：①在测坑内放置 PVC 管，用于放收集氨气的海绵（放置位置如图 2 所示），PVC 管外径尺寸为 16 cm，高 10 cm；②将浸润磷酸甘油的海绵放入提前安置好的 PVC 管中，灌水后第 1、2、3、5、7 天 08:00 收集；③收集的海绵带回实验室，用 1.0 mol/L 的 KCl 溶液浸提：海绵放入 500 mL 棕色塑料瓶中后加入 300 mL 的 KCl 溶液，充分震荡 1 h 取 25~40 mL 浸取液；④利用流动分析仪（AA3，德国）测定浸提液的铵态氮量；⑤计算氮挥发速率^[20]： NH_3-N （kg/（hm²·d））= $[M/(A \times D)] \times 10^{-2}$ ，其中 M 为通气法装置每次捕获氮挥发量的平均值（NH₃-N，mg）， A 为每个氮捕获装置的内横截面积（m²）， D 为连续捕获的时间（d）；氮挥发通量^[20]： NH_3-N （kg/hm²）= $[M/A] \times 10^{-2}$ ，其中 M 为通气法装置每次捕获氮挥发量的平均值（NH₃-N，mg）， A 为每个氮捕获装置的内横截面积（m²）；氮挥发累积通量^[20]：玉米生育期内每次测定氮挥发通量之和。交替滴灌处理分干湿区各收集一处（1、3 滴灌带工作时，湿区取 B，干区取 A；2、4 滴灌带工作时，反之），常规滴灌处理只收集任意一处。

1.3.2 土壤铵态氮量

每次灌水后 1、2、3、5、7 d 取样，在交替滴灌处理的干湿区的氨气收集装置附近取 0~20 cm 新鲜土样，常规滴灌处理只取氨气收集装置附近 0~20 cm 新鲜土样。每份样品称 10 g，添加 2 mol/L 的 KCl 溶液 50 mL，200~300 r/min 震荡 60 min，过滤后使用流动分析仪（AA3，德国）测定铵态氮量。

1.3.3 土壤酶活性

于 2021 年玉米抽雄期灌水后取玉米根区附近土壤, 取样深度 20 cm, 采用苏州科铭生物技术有限公司的土壤脲酶试剂盒(分光光度法)、过氧化氢酶试剂盒(分光光度法)、碱性磷酸酶试剂盒(分光光度法)、土壤荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶试剂盒(微量法)测定相应的土壤酶活性。

1.3.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 处理试验数据, SPSS 23 进行单因素 ANOVA 方差分析和多因素方差分析, Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 夏玉米土壤氨挥发的季节变化

图 3 为不同处理夏玉米土壤氨挥发速率的动态变化。灌出苗后 10 d 内(6 月 12—22 日), 各处理的氨挥发速率均呈下降趋势, 其中, 施加 DMPP 处理氨挥发最低值的出现时间滞后于未施加 DMPP 处理。6 月 26 日温度升高, 氨挥发速率显著增加, 随后降低且整体处于较低状态。拔节期灌水追肥后, 各处理氨挥发速率先增加, 第 2 天出现峰值后呈降低趋势。无论是否施加 DMPP, 氨挥发最大值均出现在常规浅埋滴灌处理, DI+DMPP、DI+NO 处理氨挥发速率数值分别为 0.246、0.147 kg/(hm²·d), 分别比 ADI+DMPP、ADI+NO 处理的氨挥发速率高 18.31%和 56.11%。

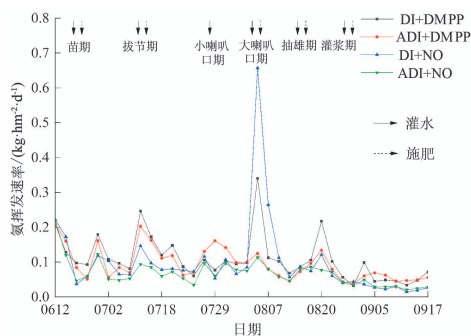


图 3 不同处理夏玉米土壤氨挥发速率的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of ammonia volatilization rate in summer maize soil under different treatment

小喇叭口期灌水前后, 各处理氨挥发速率趋势均呈先增加后降低再升高趋势, 2 次峰值处各处理氨挥发速率差值在 0.05~0.15 kg/(hm²·d) 之间。大喇叭口期灌水施肥前后, DI+DMPP、DI+NO 处理的氨挥发速率明显上升, 第 2 天达到峰值, 分别为 0.340、0.657 kg/(hm²·d), 之后 2 d 内急剧下降; ADI+DMPP、ADI+NO 处理的氨挥发速率峰值分别为 0.125、0.113 kg/(hm²·d), 并且 ADI+DMPP、ADI+NO 处理氨挥发速率趋势与 DI+DMPP、

DI+NO 处理相同。DI+DMPP 处理比 ADI+DMPP 处理的土壤氨挥发速率高 481.07%, DI+NO 处理比 ADI+NO 处理的土壤氨挥发速率高 172.75%, 其中, 常规滴灌不施加 DMPP 处理的氨挥发速率出现极高值 (0.595 kg/(hm²·d))。

抽雄期和灌浆期灌水施肥后, 各处理土壤氨挥发速率均在灌水施肥后第 2~第 3 天内达到最大值, 此期间各处理氨挥发速率较小, 在 0.01~0.1 kg/(hm²·d) 之间波动。

2.2 夏玉米土壤氨挥发的累积量

图 4 为各处理夏玉米整个生育期内土壤氨挥发累积量, 表 1 为双因素方差分析结果。施加 DMPP 对土壤氨挥发累积量有显著影响, 施加 DMPP 显著增加了土壤氨挥发损失 ($P<0.05$); DI+DMPP 处理比 DI+NO 处理的土壤氨挥发累积量高 20.73%, ADI+DMPP 处理比 ADI+NO 处理的土壤氨挥发累积量高 27.54%。灌水方式也显著影响氨挥发累积量, 交替滴灌显著降低了土壤的氨挥发累积量 ($P<0.05$), 其中, 施加 DMPP 条件下, ADI 处理的氨挥发累积量比 DI 处理降低 20.61%; 未施加 DMPP 条件下, 与 DI 处理相比, ADI 处理的氨挥发累积量降低了 18.3%。DMPP 与灌水方式的交互作用对土壤氨挥发累积通量有显著影响 ($P<0.05$), 4 个处理中, DI+DMPP 处理的土壤氨挥发损失最大, 而 ADI+NO 处理则显著降低了土壤氨挥发量。

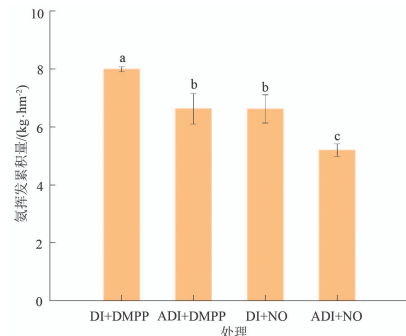


图 4 不同处理夏玉米土壤氨挥发累积量

Fig.4 Soil ammonia volatilization accumulation of summer maize under different treatments

表 1 土壤氨挥发累积量显著性分析结果

Table 1 Results of significance analysis of soil ammonia volatilization accumulation

DMPP	灌水方式	DMPP×灌水方式
*	*	*

注 *表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 夏玉米土壤铵态氮量变化

图 5 为夏玉米生育期内不同处理土壤铵态氮量的动态变化, 表 2 给出了不同生育期灌水施肥后峰值处土壤铵态氮量的显著性分析结果。各处理的土壤铵态氮量变化趋势与氨挥发速率基本一致, 但各

处理土壤中铵态氮量在灌水施肥后 1 d 内即达到峰值。由表 2 可知，拔节期灌水施肥后，灌水方式和 DMPP 及二者交互作用显著影响峰值处土壤铵态氮量 ($P<0.05$)，其中，在施加 DMPP 的 2 个处理中，DI+DMPP 处理的铵态氮量较 ADI+DMPP 处理显著增加了 37.70%，但未施加 DMPP 的 2 个处理之间差异不显著。施加 DMPP 显著增加土壤铵态氮量。

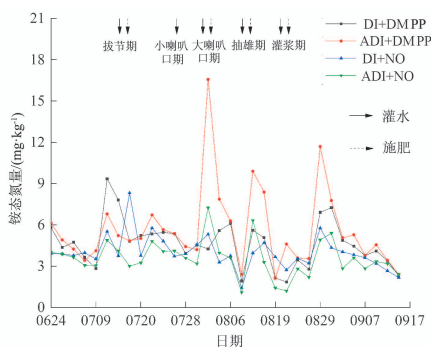


图 5 不同处理夏玉米土壤铵态氮量的季节变化

Fig.5 Seasonal variation of ammonium nitrogen content in summer maize soil under different treatments

表 2 土壤铵态氮量显著性分析结果

Table 2 Results of significance analysis of soil ammonium nitrogen content

生育期	DMPP	灌水方式	DMPP×灌水方式
拔节期	*	*	*
小喇叭口期	ns	ns	ns
大喇叭口期	*	*	*
抽雄期	ns	ns	ns
灌浆期	ns	ns	ns

注 *表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；ns 表示不同处理间无明显差异 ($P>0.05$)。

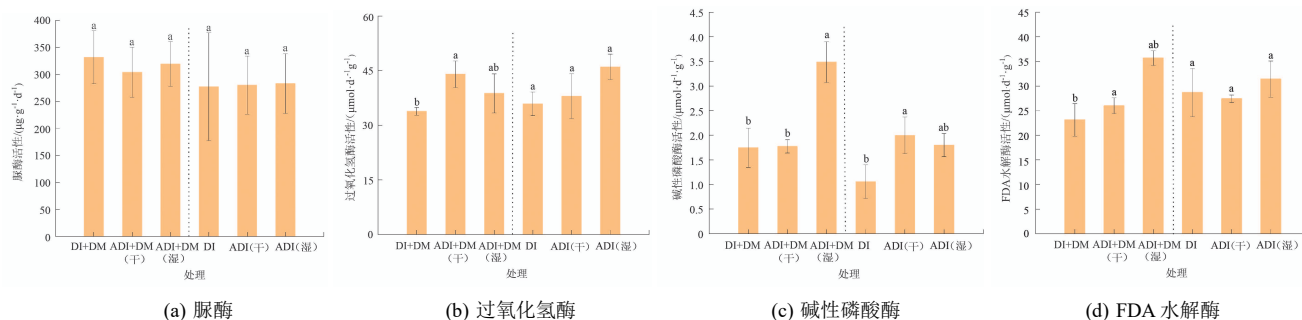


图 6 夏玉米抽雄期根区土壤酶活性

Fig.6 Soil enzyme activity in maize root zone at tasseling stage

碱性磷酸酶通过参与土壤中磷循环过程，对土壤理化性质产生影响，与土壤养分和土壤微生物量紧密相关^[22]。无论是否施加硝化抑制剂，灌水方式对碱性磷酸酶活性均具有显著影响 ($P<0.05$)。施加 DMPP 的处理中，ADI+DMPP 处理中的湿区酶活性比其干区和 DI+DMPP 处理中的酶活性高 99.48%和 96.56%；然而不施加 DMPP 时，ADI+NO 处理的干区的碱性磷酸酶活性显著高于 DI+NO 处理。

FDA 水解酶与微生物活性显著相关^[23]。在施加 DMPP 的 2 个处理中，ADI+DMPP 处理中湿区的

小喇叭口期，4 个处理土壤铵态氮量相近，灌水方式和施加 DMPP 并未对峰值处土壤铵态氮量有显著影响 ($P>0.05$)。

大喇叭口期灌水施肥后，灌水方式和 DMPP 及二者交互作用对峰值处土壤铵态氮量有显著影响 ($P<0.05$)。由图 5 可知，ADI+DMPP 处理的铵态氮量达到生育期最大值 15.80 mg/kg，比 ADI+NO 处理土壤铵态氮量增加 222.45%，然而，DI+NO、ADI+NO 处理的土壤铵态氮量值接近。抽雄期和灌浆期的土壤铵态氮量在 5~10 mg/kg 之间，灌水方式和 DMPP 对土壤铵态氮量没有显著影响 ($P>0.05$)。但在这 2 个生育期土壤铵态氮量峰值处，ADI+DMPP 处理的土壤铵态氮量显著高于其他处理。

2.4 夏玉米根区土壤酶的变化

图 6 为抽雄期灌水施肥后玉米根区附近的土壤酶活性。脲酶具有促进尿素水解成可供作物吸收利用的铵态氮的作用^[19]。无论是否施加硝化抑制剂 DMPP，灌水方式对脲酶活性无显著影响 ($P>0.05$)，4 个处理脲酶活性均在 300 $\mu\text{g}/(\text{d}\cdot\text{g})$ 左右。

过氧化氢酶具有减轻有毒物质累积对作物伤害的作用，与土壤微生物活性紧密相关^[21]。在施加 DMPP 的 2 个处理中，灌水方式对过氧化氢酶活性影响显著 ($P<0.05$)，其中，ADI+DMPP 处理的干区的过氧化氢酶活性显著高于 DI+DMPP 处理；然而，在未施加 DMPP 的处理中，不同灌水方式之间酶活性的差异不显著 ($P>0.05$)。

FDA 水解酶活性显著高于 DI+DMPP 处理 ($P<0.05$)；未施加 DMPP 处理中的 FDA 水解酶活性在 28~31 $\mu\text{mol}/(\text{d}\cdot\text{g})$ 之间，且 2 个处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论

灌溉是影响农田土壤氮素运移和转化过程的关键因素^[24]，也显著影响土壤的氨挥发。本研究中交替灌溉的氨挥发通量与常规灌溉相比显著降低 18.3%~20.61%，这与雷杨莉等^[9]研究结果一致。在

玉米生育期内的 5 次灌水后, 氨挥发速率与土壤铵态氮量变化趋势基本一致, 均为先迅速上升, 到达峰值后下降, 然后稳定在低挥发速率水平。氨挥发速率峰值的出现时间比土壤铵态氮量晚 1 d, 原因是尿素施入土壤后, 在脲酶的作用下迅速水解, 此时土壤铵态氮量快速累积, 为氨挥发提供了充足的底物^[8]。大喇叭口期灌水后 DI+DMPP 处理与 DI+NO 处理氨挥发速率高达 0.657、0.125 kg/(hm²·d), 其原因可能是施入的尿素在土壤微生物的作用下, 加速土壤有机氮的转化, 产生正激发效应, 使得氨挥发速率大幅提高^[25-26]。本研究在玉米抽雄期灌水施肥后, 土壤铵态氮量出现明显的峰值, 然而, 土壤氨挥发速率出现峰值后却维持在低挥发状态, 这可能是由于抽雄期时玉米根系代谢旺盛, 分泌酶活性较高^[27]。土壤酶活性与土壤养分紧密相关, 酶活性升高, 土壤累积养分越高效, 作物与微生物对养分的吸收和固定增多, 氮素以氨气状态的损失减小^[28]。ADI+DMPP 处理的过氧化氢酶、碱性磷酸酶、FDA 水解酶的活性明显高于 DI+DMPP 处理, 这可能是硝化抑制剂影响微生物群落功能, 进而影响微生物分泌土壤酶^[29], 而且, 其与灌溉方式的交互作用可能促使土壤酶活性发生改变, 这也是施加硝化抑制剂后氨挥发速率下降较快的原因之一。灌浆期, ADI+DMPP 处理土壤铵态氮量峰值达到 9.81 mg/kg, 显著高于其 3 个处理, 而氨挥发量与其他处理则无明显差异, 其原因可能是施加 DMPP 抑制硝化-反硝化的作用, 增加了土壤中有效氮量; 同时, ADI+DMPP 处理中的过氧化氢酶、碱性磷酸酶、FDA 水解酶活性均显著高于其他处理 (图 6), 根区附近土壤中有毒物质减少和养分有效性提高, 微生物数量和代谢提高, 加速氮固定和植物吸收营养, 故氨挥发速率并未大幅提高^[20-23]。其中灌水方式对脲酶活性没有显著影响的原因可能是脲酶活性受温度、土壤微生物活性等因素的影响^[30]。

氨氧化细菌是促进硝化作用进行的主要微生物, 向土壤中施入 DMPP 可有效降低其活性, 抑制铵态氮短时间的转化, 能较长久地供植物吸收利用并降低氮损失的概率^[31], 与此同时, 由于滴灌可减小 NH₄⁺淋溶损失, 氨挥发通量增加的风险也大大提高。本研究表明, 配施 DMPP 对玉米全生育期的氨挥发速率以及通量有显著提高作用, 这与许多研究^[32-34]结果一致。在灌水基肥施入后, 施加 DMPP 的处理氨气挥发速率有峰值延缓出现的现象, 但是每次灌水追肥之后, 各处理峰值出现时间一致, 并未出现延缓现象。董怡华等^[35]在温室中研究玉米秸秆覆盖、脲酶抑制剂与 DMPP 对土壤氨挥发影响的试验中发

现, 施肥后施用 DMPP 的处理中氨挥发速率峰值的出现时间延后, 但王甄桦等^[36]研究结果中并未出现此现象。试验结果可能受土壤质地、肥料类型、微生物种类与活性等影响^[37], 而且由于夏季温度高, 水分蒸发快, 在达到灌水下限时灌水急速补充了土壤中缺失的水分, 形成利于尿素水解的环境, 也加剧了氨挥发^[38]。

玉米不同生育阶段, 灌水方式处理与施加 DMPP 处理对土壤氨挥发速率的影响不同, 这与王林权等^[39]、崔磊等^[40]研究结果一致。本研究中, 拔节期、抽雄期、灌浆期时, 施加 DMPP 可显著提升土壤氨挥发速率; 大喇叭口期时, 交替滴灌对土壤氨挥发速率有显著降低作用; 其他生育期, 处理效果不明显。虽然施加硝化抑制剂 DMPP 能有效抑制硝化作用并延长肥料的时效性, 但对夏玉米土壤的氨排放有明显促进作用; 交替滴灌与施加 DMPP 对氨挥发累积的影响存在交互效应, 交替滴灌对氨挥发累积的降低效应小于施加 DMPP 对氨挥发累积的增加效应。

4 结 论

1) 灌水方式显著影响氨挥发, 交替滴灌较常规地下滴灌更加有效降低了 12.70%~45.45% 的氨挥发累积量, 但受玉米生育期和玉米根区土壤酶活性影响。

2) 施加硝化抑制剂 DMPP 虽然有效抑制硝化过程, 但也显著增加了玉米全生育期的氨挥发速率和累积量, 施加 DMPP 处理的氨挥发累积量为 5.97~8.10 kg/hm², 而未施加 DMPP 处理的氨挥发累积量为 5.01~7.29 kg/hm²。

3) 采取 ADI+NO 的组合处理在氨挥发减排方面效果最优。

参考文献:

- [1] 仇焕广, 李新海, 余嘉玲. 中国玉米产业: 发展趋势与政策建议[J]. 农业经济问题, 2021, 42(7): 4-16.
QIU Huanguang, LI Xinhai, YU Jialing. China maize industry: Development trends and policy suggestions[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, 42(7): 4-16.
- [2] 中国国家统计局. 2021 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook-2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [3] 田昌玉, 孙文彦, 林治安, 等. 氮肥利用率的问题与改进[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 9-16.
TIAN Changyu, SUN Wenyan, LIN Zhian, et al. Problems and improvements of recovery efficiency of applied N[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(4): 9-16.
- [4] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J].

- Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273.
- [5] 刘阳阳, 李亚芳, 虞娜, 等. 水氮调控对设施土壤氨挥发特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 334-342.
LIU Yangyang, LI Yafang, YU Na, et al. Effects of water and nitrogen regulation on soil ammonia volatilization in greenhouse[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 334-342.
- [6] 李然, 蔡威威, 艾天成, 等. 稻田氨挥发损失和水稻产量对不同水氮处理的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 47-54.
LI Ran, CAI Weiwei, AI Tiancheng, et al. Responses of ammonia volatilization and grain yield under different water and fertilizer practices in a rice paddy[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(3): 47-54.
- [7] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1 179-1 187.
ZHANG Yingpeng, LI Hongjie, LIU Zhaohui, et al. Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss from wheat-maize rotation system of farmland in Chao soil region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1 179-1 187.
- [8] 韩坤, 张纪涛, 上官宇先, 等. 交替灌溉条件下水氮耦合对土壤气态氮排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1 557-1 563.
HAN Kun, ZHANG Jitao, SHANGGUAN Yuxian, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil gaseous nitrogen emission under alternate irrigation & N placement[J]. Environmental Science, 2011, 32(6): 1 557-1 563.
- [9] 雷杨莉, 王林权, 薛亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 41-46.
LEI Yangli, WANG Linqun, XUE Liang, et al. Effect of alternative irrigation and fertilization on soil ammonia volatilization of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 41-46.
- [10] BREMNER J M. Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer[J]. Fertilizer Research, 1995, 42(1/2/3): 321-329.
- [11] 俞巧钢, 殷建祯, 马军伟, 等. 硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1 057-1 066.
YU Qiaogang, YIN Jianzhen, MA Junwei, et al. Effects of nitrification inhibitor DMPP application in agricultural ecosystems and their influencing factors: A review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(6): 1 057-1 066.
- [12] QIAO C L, LIU L L, HU S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1 249-1 257.
- [13] LAM S K, SUTER H, MOSIER A R, et al. Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N₂O emission: A double-edged sword[J]. Global Change Biology, 2017, 23(2): 485-489.
- [14] 高珊, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 温室土壤不同含水量下施用 DCD 和 DMPP 对 N₂O 排放及 NH₃ 挥发的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 95-101.
GAO Shan, GUO Yanjie, ZHANG Lijuan, et al. Effects of DCD and DMPP on the nitrous oxide emissions and ammonia volatilization from greenhouse soil under different water contents[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(4): 95-101.
- [15] FRENEY J R, KEERTHISINGHE D G, PHONGPAN S, et al. Effect of urease, nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand[J]. Fertilizer Research, 1994, 40(3): 225-233.
- [16] DE KLEIN C, NOVOA R S A, OGLE S. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application[R]. Hayama: IGES, 2006.
- [17] 莫彦, 李光永, 蔡明坤, 等. 基于 HYDRUS-2D 模型的玉米高出苗率地下滴灌开沟播种参数优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 105-112.
MO Yan, LI Guangyong, CAI Mingkun, et al. Selection of suitable technical parameters for alternate row/bed planting with high maize emergence under subsurface drip irrigation based on HYDRUS-2D model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 105-112.
- [18] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 5-9.
PENG Shizhang, XU Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(6): 5-9.
- [19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 359-365.
WANG Zhaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. In situ determination of ammonia volatilization from wheat maize rotation system field in North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 359-365.
- [20] 丰骁, 段建平, 蒲小鹏, 等. 土壤脲酶活性两种测定方法的比较[J]. 草原与草坪, 2008, 28(2): 70-72.
FENG Xiao, DUAN Jianping, PU Xiaopeng, et al. Comparative analyses between two methods of measuring soil urease activity[J]. Grassland and Turf, 2008, 28(2): 70-72.
- [21] 裴玲芳, 范贵鹏, 肖美玲, 等. 两种方法测定土壤中过氧化氢酶比较[J]. 科技创新与应用, 2019(15): 145-146, 149.
- [22] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. 微生物学通报, 2012, 39(3): 416-427.
NIU Shiquan, YANG Jianwen, HU Lei, et al. Relationship with soil microbial quantity, soil enzyme activity and physicochemical factor between different saline-alkali soil in Hexi Corridor in spring[J]. Microbiology China, 2012, 39(3): 416-427.
- [23] NSABIMANA D, HAYNES R J, WALLIS F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 26(2): 81-92.
- [24] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 不同沟灌方式下玉米根区矿物氮迁移动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 540-547.
LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Transfer of mineral nitrogen in maize root zone soil under different furrow irrigation modes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 540-547.
- [25] 孙悦, 徐兴良, KUZYAKOV Yakov. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 62-75.
SUN Yue, XU Xingliang, YAKOV K. Mechanisms of rhizosphere priming effects and their ecological significance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(1): 62-75.
- [26] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 303-312.
LIU Shaowen, YIN Min, CHU Guang, et al. Research progress of soil nitrogen priming effect and its microbial mechanisms[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 303-312.
- [27] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5 502-5 511.
MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5 502-5 511.
- [28] BENDING G D, TURNER M K, RAYNS F, et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1 785-1 792.
- [29] 呼娟娟, 陶瑞, 褚贵新. 有机无机肥配合生化抑制剂抑制土壤有机碳的转化[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 19-31.
HU Juanjuan, TAO Rui, CHU Guixin. Partial replacement of inorganic N with cattle manure and combining use of biochemical inhibitors inhibit organic carbon conversion in soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(1): 19-31.

- [30] FREEMAN C, LISKA G, OSTLE N J, et al. Microbial activity and enzymic decomposition processes following peatland water table drawdown[J]. *Plant and Soil*, 1996, 180(1): 121-127.
- [31] 许超, 吴良欢, 张福锁. DMPP 农业应用研究进展[J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 478-482.
- XU Chao, WU Lianghuan, ZHANG Fusuo. Advances in the study of DMPP in agriculture[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 478-482.
- [32] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 682-686.
- SU Fang, HUANG Binxiang, DING Xinquan, et al. Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizer types[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 682-686.
- [33] 肖强, 李丽霞, 李鸿雁, 等. 改性尿素追施对冬小麦和夏玉米季氮素挥发和淋溶的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 270-279.
- XIAO Qiang, LI Lixia, LI Hongyan, et al. Effects of modified urea topdressing on nitrogen volatilization and leaching in winter wheat and summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 270-279.
- [34] 李艳勤, 刘刚, 红梅, 等. 优化施氮对河套灌区氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(2): 578-584.
- LI Yanqin, LIU Gang, HONG Mei, et al. Effect of optimized nitrogen application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in Hetiao irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2): 578-584.
- [35] 董怡华, 张玉革, 孙树林, 等. 不同尿素配施处理下土壤氨挥发特性[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 2 943-2 949.
- DONG Yihua, ZHANG Yuge, SUN Shulin, et al. Soil ammonia volatilization under different urea combined fertilization treatments[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 2 943-2 949.
- [36] 王甄烨, 焉莉, 蒋富琛, 等. 脲酶/硝化抑制剂配施氮肥对春玉米农田氨排放的影响[J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 138-143.
- WANG Zhenye, YAN Li, JIANG Fuchen, et al. Effect of urease/nitrification inhibitor combined application of nitrogen fertilizers on ammonia emission from spring corn farmland[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 138-143.
- [37] FRENEY J R, KEERTHISINGHE D G, PHONGPAN S, et al. Effect of urease, nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 40(3): 225-233.
- [38] 邢月, 沙之敏, 卓志钢, 等. 不同施肥方式对稻田氨挥发特征的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(17): 313-318.
- XING Yue, SHA Zhimin, BEI Zhigang, et al. Effects of different fertilization methods on ammonia volatilization characteristics in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(17): 313-318.
- [39] 王林权, 周春菊. 夏玉米水肥异区交替灌溉施肥的产量与环境效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1 651-1 658.
- WANG Linquan, ZHOU Chunju. Advances in researches of yield and environmental effect of alternate furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply on summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1 651-1 658.
- [40] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 高效稳定性硫酸铵氮肥在黑土中的施用效果[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2 390-2 398.
- CUI Lei, LI Dongpo, WU Zhijie, et al. Effects of high efficiency and stability ammonium sulfate fertilizer applied in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2 390-2 398.

Effect of Alternative Drip Irrigation and Nitrification Inhibitors on Ammonia Volatilization and Soil Enzymatic Activity in a Summer Maize Field

YANG Le^{1,2}, CAO Hui¹, FU Yuanyuan¹, ZHANG Yingying¹, GAO Yang^{1*}, LIU Zhandong¹

(1. Institute of Filed Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100082, China)

Abstract: 【Objective】 Nitrification inhibitors have been increasingly used over the last decades to reduce nitrogen loss from soil. The objective of this paper is to investigate the combined influence of irrigation and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and enzymatic activity in soil. 【Objective】 The experiment was conducted in a summer maize field using 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) as the nitrification inhibitor. There were four treatments: conventional subsurface drip irrigation with (DI+DMPP) and without (DI+NO) applying DMPP, alternate subsurface drip irrigation with (ADI+DMPP) and without (ADI+NO) applying DMPP. In each treatment, we measured the ammonia volatilization rate at different growing stages, accumulation of ammonia volatilization over the whole growth season, as well as enzymatic activities in the soil. 【Result】 Irrigation method and DMPP both affected NH₃ volatilization, but the effect varied with growing stage. Applying DMPP increased ammonia volatilization rate significantly at jointing stage, heading stage, and filling stage, regardless of the irrigation method. It was found that the alternate drip irrigation reduced ammonia volatilization rate significantly but only at the booting stage. Compared to DI treatments, ADI treatments reduced ammonia volatilization accumulation by 12.70%~45.45%, but applying DMPP increased ammonia volatilization from both irrigation treatments significantly. At the heading stage, ADI treatments improved the activities of catalase, alkaline phosphatase and FDA hydrolase in the root zone, but had no significant effect on urease activity. Applying DMPP did not show a noticeable effect on enzymatic activity in the root zone. 【Conclusion】 Alternate surface drip irrigation without applying nitrification inhibitors can effectively reduce ammonia volatilization and nitrogen loss. It can be used as an improved agronomic method for sustainable production of maize in the studied area.

Key words: maize; alternate drip irrigation; DMPP; ammonia volatilization

责任编辑: 白芳芳