中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

不同水氮管理对梨园土壤氨挥发的影响

邢寒冰，董文旭，庞桂斌，胡春胜

Effects of different water and nitrogen management on ammonia volatilization in pear orchard soil

XING Hanbing, DONG Wenxu, PANG Guibin, and HU Chunsheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210133

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响

The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1880-1889

稻蛙共作对水稻-紫云英轮作系统氨挥发的影响

Effect of rice-frog cultivation on ammonia volatilization in rice-Chinese milk vetch rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 792-801

家畜圈舍粪尿表层酸化对氨气排放的影响

Impact of surface acidification of manure on ammonia emission in animal housing

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 677-685

改性尿素硝酸铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究

Effects of modified urea ammonium nitrate solution topdressing on ammonia volatilization and leaching

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1200-1209

界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响

Effects of interface barrier materials on rice yield, nitrogen use efficiency, and NH_3 volatilization

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 803-812

控释与稳定尿素配施对土壤氮素迁移及冬小麦-夏玉米产量的影响

Effects of controlled-release and stable urea application on soil nitrogen transport and yields of winter wheat and summer maize

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1591-1599

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 12 月 第 29 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2021, 29(12): 2013−2023

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210133

邢寒冰, 董文旭, 庞桂斌, 胡春胜. 不同水氮管理对梨园土壤氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(12): 2013−2023

XING H B, DONG W X, PANG G B, HU C S. Effects of different water and nitrogen management on ammonia volatilization in pear orchard soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 2013−2023

不同水氮管理对梨园土壤氨挥发的影响*

邢寒冰[1,2], 董文旭[1**], 庞桂斌[2], 胡春胜[1]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省土壤生态学重点实验室 石家庄 050022; 2. 济南大学水利与环境学院 济南 250000)

摘 要: 根际注射施肥在果树种植上应用广泛, 但目前注射施肥及配套灌溉管理对果园氨挥发的影响尚不明确。本文于 2019 年 3—9 月在河北省晋州市果园示范基地进行, 利用动态箱法分析了梨树追肥时期不同水氮管理下土壤氨挥发速率和损失量的变化规律。试验设置 5 个处理: 不施肥 (CK)、氮肥表面撒施+常规灌溉 (BW1)、注射施肥+常规灌溉 (IW1)、氮肥表面撒施+节水灌溉 (BW2)、注射施肥+节水灌溉 (IW2)。结果表明, 各处理各时期氨挥发基本在施肥后 1 d 达到峰值, 在 5~10 d 后结束。BW1、IW1、BW2、IW2 氨挥发损失量差异均达显著水平 (P<0.05), 分别为 24.05 kg·hm^{-2}、8.43 kg·hm^{-2}、31.94 kg·hm^{-2} 和 14.06 kg·hm^{-2}; 与传统管理 (BW1) 相比注射施肥处理 (IW1 和 IW2) 减排率分别达 64.95% 与 41.54%。撒施处理氨挥发受灌溉量影响较大, 根际注射施肥可以显著降低氨挥发的排放, 且受灌溉量影响较小。相关分析表明, 氨挥发与土壤铵态氮含量和 pH 呈正相关, 与硝态氮含量呈负相关, 且与铵态氮和硝态氮的相关性均达到极显著水平 (P<0.01); 土壤水分与铵态氮呈正相关且达极显著水平 (P<0.01)。与传统管理方式相比, 根际注射施肥与节水灌溉结合是减少果园氨挥发的有效途径之一。

关键词: 果园; 水氮管理; 根际注射施肥; 氨挥发; 氨减排

中图分类号: S143.1 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of different water and nitrogen management on ammonia volatilization in pear orchard soil*

XING Hanbing[1,2], DONG Wenxu[1**], PANG Guibin[2], HU Chunsheng[1]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250000, China)

Abstract: Conventional pear tree fertilization and management results in fertilizer waste, environmental contamination and other problems. The long-term goal of farmland managers is to use soil water and fertilizers efficiently to improve crop yield. In this study, the dynamic box method was used to analyze changes in the soil ammonia volatilization rate, loss, and the physical and chemical properties under different water and nitrogen management regimes in the pear topdressing period in the orchard demonstration base of Jinzhou City, Hebei Province, from March to September 2019. The experiment had five treatments: blank (CK, no fertilization with conventional irrigation), compound fertilizer broadcasting and conventional irrigation (BW1), rhizosphere injection (20 cm deep) of

* 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213300) 资助

** 通信作者: 董文旭, 主要研究方向为农田碳氮循环及环境效应的研究。E-mail: dongwx@sjziam.ac.cn
邢寒冰, 主要研究方向为农田节水灌溉。E-mail: 17862903330@139.com

收稿日期: 2021-03-09 接受日期: 2021-05-28

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC0213300).

** Corresponding author, E-mail: dongwx@sjziam.ac.cn

Received Mar. 9, 2021; accepted May 28, 2021

liquid fertilizer and conventional irrigation (IW1), compound fertilzer broadcasting and 70% conventional irrigation (BW2), rhizosphere (20 cm deep) injection of liquid fertilizer and 70% conventional irrigation (IW2). The volatilization of ammonia in each treatment was the most severe in the first four days after fertilization. Two treatments of compound fertilizer broadcasting (BW1 and BW2) were especially severe, the peak variation range was 1.5−7.5 kg·hm^{-2}·d^{-1}. Two treatments of rhizosphere injection of liquid fertilizer (IW1 and IW2) steadily changed with time, the peak range was 0.1−5.0 kg·hm^{-2}·d^{-1}. The volatile loss of ammonia in the BW1, IW1, BW2, and IW2 treatments was 24.05 kg·hm^{-2}, 8.43 kg·hm^{-2}, 31.94 kg·hm^{-2}, and 14.06 kg·hm^{-2}, respectively; compared with BW1 (traditional management), the emission reduction rates of rhizosphere injection of liquid fertilizer (IW1 and IW2) was 64.95% and 41.54%, respectively. Ammonia volatilization was significantly affected by the irrigation amount, and rhizosphere injection fertilization significantly reduced ammonia volatilization emission and was less affected by the irrigation amount. Correlation analysis showed that ammonia volatilization was positively correlated with the soil ammonium nitrogen content and pH, but negatively correlated with the soil nitrate nitrogen content. The correlation between ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was highly significant (P<0.01). Soil moisture was positively correlated with ammonium nitrogen content (P<0.01). Compared with traditional management methods, the combination of rhizosphere injection fertilization and water-saving irrigation is an effective way to reduce nitrogen loss in orchards.

Keywords: Orchard; Water and nitrogen management; Rhizosphere injection fertilization; Ammonia volatilization; Ammonia abatement

目前对梨树 (*Pyrus sorotina*) 施肥与管理方式存在着盲目与粗放性, 引起了肥料浪费与生态环境等问题[1]。氮素是植物生长所必需的营养元素之一, 也是主要的养分限制因子, 施肥后的氨挥发被认为是全球土壤-植物系统氮素流失的主要机制之一[2]。研究表明, 氨挥发损失量占农田施入氮肥的 1%~47%[3]。氨挥发产生的氨气会促进 PM2.5 的形成, 污染大气环境[4-5]。而大气中的氨主要来源于人类活动排放, 农业是其中最大的排放源, 占全球人类活动氨排放总量的 90%[6-7]。因此, 许多学者对农业氨减排做了广泛研究, 如农田上采用的脲酶抑制剂[8]、包膜缓控肥[9]、地膜覆盖[10]、减量氮肥[11]、肥料深施[12] 等措施都能有效降低氨的排放。相关统计数据表明, 我国现有的果树生产种植面积已经达到 320 万 hm^2[13], 果树种植业氨挥发损失量为 36.52~115.9 kg·hm^{-2}, 损失率高达 12%[14], 而相关的氨减排技术研究相对较少。目前, 根际注射施肥氨减排技术[15] 在果树种植业上得到广泛的应用, 该技术利用机械设备将可溶性肥料注入土壤当中, 相对于挖沟施肥, 可以避免损伤根系, 并能够促进肥料渗入从而大大降低劳动力强度。吴小宾等[16] 用^{15}N 尿素进行注射深施, 发现注射施肥能够显著提高土壤有效态养分含量和桃树果品 (*Prunus persica*) 产量。吕丽霞等[17] 在苹果 (*Malus pumila*) 园进行注射施肥研究发现, 注射液浓度以 10% 为最佳, 可以提高土壤酶活性和水肥利用效率。张林森等[18] 将传统施肥方式与注射施肥作比较, 发现此方法可以有效扩大根系对水肥的吸收面积, 提高树体对氮素的利用, 降低了土壤中氮素的残留。根际注射施肥技术在提高果树产量和品质等方面的应用已颇见成效, 但相关氨挥发减排效果少见报道, 且果树种植业中氨减排技术研究相比农田试验较为缺乏。因此, 本研究通过动态箱法[19], 探讨根际注射施肥技术和水肥管理对梨园土壤氨挥发特征与氨挥发损失量的影响, 明确氮肥深施减少土壤氨排放的效果, 为华北平原种植业的氨减排措施以及发展现代农业生态果园提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于石家庄市晋州市南小吾村梨园进行 (37°47′30″N、114°58′20″E)。试验区属暖温带大陆性季风气候。多年平均降水量 455.8 mm, 多年平均气温 13.3 ℃。年无霜期 236 d。试验区土壤类型为潮壤土, 其基本物理性质如表 1 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

供试梨树的品种为‘皇冠’, 树龄 20 年, 行距 4 m×4 m, 600 株·hm^{-2}。试验选取长势一致的皇冠梨树分区标记, 小区随机排列重复 3 次。试验小区内土壤环境一致。肥料选用复合肥 N：P：K=22：11：10, 液体肥按 1：10 稀释。试验分为开花期、前膨果期、后膨果期 3 个时期进行施肥。

设置两个因素: 灌水量和施肥方式。灌溉方案参考当地农户管理制度, 设为两个水平: 一为常规灌溉 (W1), 每个生育期灌水量均为 800 m^3·hm^{-2}; 二为节水灌溉 (W2, 灌水量为常规灌溉的 70%), 每个生育期灌水量为 560 m^3·hm^{-2}。施肥方式分为撒施 (B) 和注

表 1　试验区土壤基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of soil in test area

深度 Depth (cm)	pH	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	有机质含量 Organic matter content ($g\cdot kg^{-1}$)	NO_3^--N ($mg\cdot kg^{-1}$)	NH_4^+-N ($mg\cdot kg^{-1}$)
0~40	8.5	1.47	16.7	34.4	2.6
40~90	7.8	1.45	7.8	21.6	0.7
90~180	7.7	1.43	5.4	29.1	0.9

射深施 (I, 离树 1 m 处围树绕圈每间隔 20 cm 注射一次, 注射深度为 20 cm)。施肥量依据当地农户施肥标准制定。各处理的追肥时间、追肥量及灌水方案见表 2。

表 2　不同处理追肥时期的施肥和灌水方案

Table 2　Schemes of irrigation and fertilization during topdressing periods of different treatments

处理 Treatment	水肥管理方式 Irrigation and fertilization methods	施氮量 Nitrogen application ($kg\cdot hm^{-2}$)				灌溉总量 Total irrigation ($m^3\cdot hm^{-2}$)
		开花期 Flowering period	前膨果期 Pre-expansion period	后膨果 Post-expansion period	总量 Total	
CK	不施肥+常规灌溉 No fertilization+conventional irrigation	0	0	0	0	3200
BW1	复合肥撒施+常规灌溉 Compound fertilizer broadcasting+conventional irrigation	168	96	270	792	3200
IW1	液体肥注射深施+常规灌溉 Deep injection of liquid fertilizer+conventional irrigation	168	96	270	792	3200
BW2	复合肥撒施+70%灌溉 Compound fertilizer broadcasting+70% conventional irrigation	168	96	270	792	2240
IW2	液体肥注射深施+70%灌溉 Deep injection of liquid fertilizer+70% conventional irrigation	168	96	270	792	2240

1.2.2　测定项目与方法

1) 氨挥发测定。采用密闭室间歇式通气法[19], 所用密闭室装置由有机玻璃罩 (直径 20 cm, 高 15 cm)、PVC 管、白色乳胶管、250 mL 容量洗气瓶和 1300 W 真空泵组成, 洗气吸收溶液为 2% 硼酸, 吸收后铵浓度测定采用 0.02 $mol\cdot L^{-1}$ 的硫酸滴定。施肥后第 1 天开始测定, 每天 9:00—11:00 测定 2 h, 持续测定直至施氮处理与不施肥处理的氨挥发通量无差异时为止 (7~10 d)[20]。

氨挥发通量 (F, $kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$) 计算公式为:

$$F = \text{硼酸吸收氨气的质量}/(\text{装置覆盖土壤的面积}\times\text{采样时间}) \quad (1)$$

氨挥发累积挥发量 (E_i, $kg\cdot hm^{-2}$) 计算公式为:

$$E_i = F_1 + F_2 + \cdots + F_i \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 天的氨挥发通量 ($kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$)。

$$\text{氮净损失率} = (\text{施氮区氨挥发累积量} - \text{CK处理氨挥发累积量})/\text{施氮量}\times 100\% \quad (3)$$

$$\text{氮减排率} = (\text{BW1处理氨挥发累积量} - \text{其他处理土壤氨挥发累积量})\ /\ \text{BW1处理土壤氨挥发累积量}\times 100\% \quad (4)$$

2) 土样的采集: 采用多点混合法采集 0~5 cm 土壤样品, 采集频率与氨挥发时间一致。土壤样品采集后集中放于 4 ℃ 冰箱保存, 经 0.01 $mol\cdot L^{-1}$ KCl 溶液浸提, 用于铵态氮与硝态氮的测定。

土壤 pH 测定: 称取 10 g 风干土加入去离子水 (水土比 2.5∶1), 搅拌 2 min, 静置 30 min 后使用 pH 计 (FE 20) 进行测定。

土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 的测定: 样品采用紫外分光光度计 (UV-2450) 测定 NO_3^--N 含量; 全自动化学分析仪 (SMART CHEM 140) 测定 NH_4^+-N 含量。

3) 气象数据: 采用距试验地 50 m 的气象站自动观测数据。

4) 大田中埋设了 EM50 土壤多参数检测仪, 用于体积含水率与土壤温度的测量。

1.3　数据整理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 进行数据计算和统计, 不同处理间方差分析采用 Duncan 法进行差异显著性分析, $P<0.05$ 为显著水平, $P<0.01$ 为极显著水平。利用 Excel 2010 进行绘制图表。

2　结果与分析

2.1　氨挥发速率变化特征

3 次施肥期间, 不施肥对照处理 (CK) 没有明显挥发速率变化, 基本保持在 0.01~0.02 $kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$ 本底水平。除 CK 处理外, 开花期 (6 月) 氨挥发通量随时间有着明显的变化 (图 1)。氨挥发在前 4 d 变化最为明显, 其中两种撒施处理 (BW1、BW2) 速率较大,

与 CK 处理相比氨挥发速率均达显著或极显著差异水平。BW1 和 BW2处理在第 1 天氨挥发速率最大, 分别为 1.24 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 1.28 kg·hm^{-2}·d^{-1}; 而两种注射处理 (IW1、IW2) 氨挥发速率随时间变化比较平稳, 在 0~0.1 kg·hm^{-2}·d^{-1} 区间波动, 其趋势与两种撒施处理基本一致, 但在施肥后的第 3 天才出现最大峰值, 分别为 0.04 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 0.1 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 随后缓慢降低直至与空白处理基本一致。

前膨果期 (8 月) 各处理土壤氨挥发速率变化规律基本与开花期一致, 但前膨果期的土壤氨挥发速率总体高于开花期。各处理氨挥发峰值发生在施肥后第 1 天, BW1、IW1、IW2 和 BW2 处理的峰值分别为 2.2 kg·hm^{-2}·d^{-1}、0.73 kg·hm^{-2}·d^{-1}、0.49 kg·hm^{-2}·d^{-1} 和 2.15 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 此后挥发速率迅速下降。在施肥后的第 4 天, 两种注射处理 (IW1、IW2) 挥发基本结束, 而两种撒施处理 (BW1、BW2) 仍持续挥发。直至施肥后第 7 天, 不同处理的土壤氨挥发速率无明显差异。

与其他时期相比, 后膨果期 (9 月) 土壤氨挥发速率最高。除 BW2 处理, 其余处理施肥后土壤氨挥发速率第 1 天均达最大值, 分别为 BW1 4.46 kg·hm^{-2}·d^{-1}、IW1 3.47 kg·hm^{-2}·d^{-1}、IW2 4.71 kg·hm^{-2}·d^{-1}。BW2 处理在第 2 天达峰值, 也是本时期土壤氨挥发速率的最大值 (7.5 kg·hm^{-2}·d^{-1}), 相当于开花期土壤挥发高峰期速率的 6 倍, 前膨果期的 3 倍左右。该期 BW2 处理在施肥后的第 4 天仍持续挥发。施肥后第 9 天, 各处理氨挥发通量保持在 0.01~0.05 kg·hm^{-2}·d^{-1}, 到施肥后第 12 天挥发基本结束。

2.2 氨挥发累积量特征

不同处理下的土壤氨挥发累积量变化特征曲线形状相似 (图 2), 土壤氨挥发过程可分为两个阶段: 前期 (1~3 d) 累积挥发迅速增加, 后期 (3~9 d) 挥发累积量增加缓慢。随着灌水量的降低, 在同一施肥方式下, 土壤氨挥发最大累积量呈增加的趋势, 如 BW2>BW1, IW2>IW1。当灌水量相同时, 不同施肥方式下的土壤氨挥发累积曲线差异表现为撒施处理氨挥发累积量均大于注射深施处理, 二者之间差异达显著水平 (P<0.05), 即: BW2>IW2, BW1>IW1。各时期氨挥发累积量变化趋势基本相同, 均为 BW2>BW1>IW2>IW1>CK。

表 3 为不同处理下的氨挥发累积量及损失率。从各个施肥时期来看, 氨挥发累积量顺序为: 后膨果期>前膨果期>开花期。CK 处理作为土壤挥发本底, 各时期施肥处理氨挥发损失率为 0.06%~10.85% (平均 3.5%)。

开花期常规处理 BW1 累积挥发量为 2.42 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 1.44%; 而 BW2 处理的累积挥发量最高, 为 3.81 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 2.77%, 比 BW1 处理增加 1.39 kg·hm^{-2} 的损失量; IW1、IW2 处理显著降低挥发排放, 与常规处理 BW1 相比, 减排率分别为 95.83%、90.97%。前膨果期 BW2 处理累积量同样最高, 为 6.03 kg·hm^{-2}, 占施氮量的 6.28% 。而注射处理 IW1、IW2 与常规处理 BW1 相比累积挥发量分别减少 65.22% 和 74.70%, 差异均达显著水平 (P<0.05); 而两种注射处理之间减排效果没有显著差异。后膨果期挥发累积量为所有时期中最高, 其中 BW2

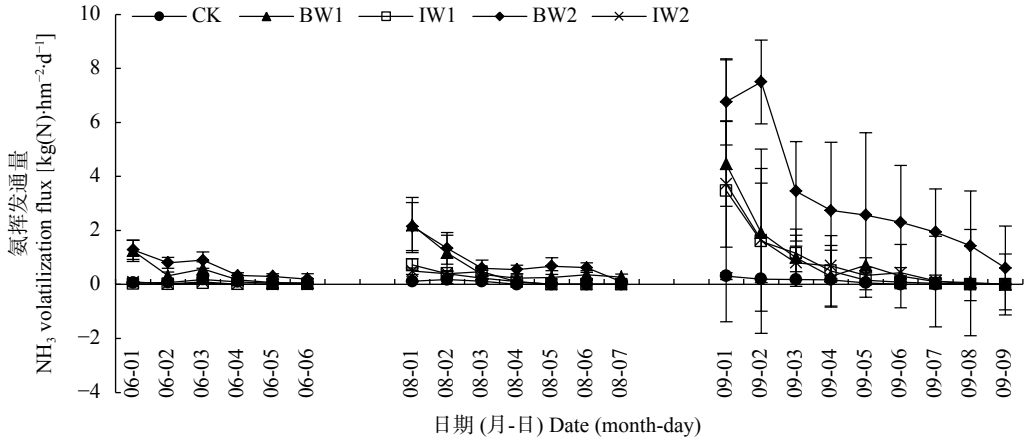

图 1 不同施肥处理下梨园土壤不同施肥时期氨挥发通量变化 (6、8、9 月分别为开花期、前膨果期、后膨果期氨挥发通量变化情况; CK、BW1、IW1、BW2、IW2 含义见表 2)

Fig. 1 Variations of ammonia volatilization fluxes in pear orchard soil under different fertilization treatments (June, August and September show the changes of ammonia volatilization fluxes in flowering period, pre- and post-expansion period. The meanings of CK, BW1, IW1, BW2 and IW2 are shown in the table 2)

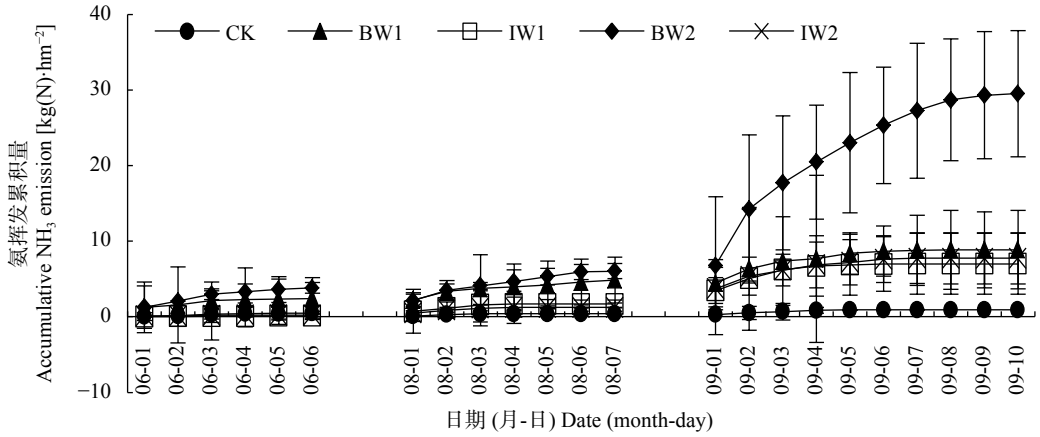

图 2　不同施肥处理下梨园土壤不同施肥时期氨挥发累积量变化 (6、8、9 月分别为开花期、前膨果期、后膨果期; CK、BW1、IW1、BW2、IW2 含义见表 2)

Fig. 2　Variations of volatile accumulation of ammonia in pear orchard soil under different fertilization treatments (June, August and September show the changes of ammonia volatilization fluxes in flowering period, pre- and post-expansion period. The meanings of CK, BW1, IW1, BW2 and IW2 are shown in the table 2)

表 3　不同时期不同施肥处理下梨园土壤氨挥发总累积量及损失率

Table 3　Total ammonia volatile accumulations and loss rates of pear orchard soil under different fertilization treatments at different periods

施肥时期 Fertilization period	指标 Index	CK	BW1	IW1	BW2	IW2
开花期 Flowering period	累积氨挥发量 Accumulation ammonia volatilization (kg·hm^{-2})	0.50±0.09c	2.42±0.06b	0.10±0.09a	3.81±1.51b	0.22±0.05c
	损失率 Loss rate (%)	—	1.44±0.05b	0.06±0.01c	2.77±1.03a	0.13±0.01c
前膨果期 Pre-expansion period	累积挥发量 Accumulation ammonia volatilization (kg·hm^{-2})	0.40±0.01c	4.86±0.19b	1.69±0.17a	6.03±2.35c	1.23±0.13b
	损失率 Loss rate (%)	—	5.06±0.27b	1.76±0.12b	6.28±1.89b	1.28±0.11b
后膨果期 Post-expansion period	累积氨挥发量 Accumulation ammonia volatilization (kg·hm^{-2})	2.44±0.06b	16.77±2.64a	6.64±0.45b	29.30±5.06b	12.61±3.04b
	损失率 Loss rate (%)	—	6.21±0.41b	2.46±0.27b	10.85±3.81b	4.67±2.14b
总挥发损失量 Total volatilization (kg·hm^{-2})		3.34±0.08c	24.05±3.17a	8.43±1.02b	39.14±5.09b	14.06±3.12b
总减排率 Total emission reduction rate (%)		—	—	64.95	−62.77	41.54

不同小写字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。CK、BW1、IW1、BW2和IW2含义见表2。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level. The meanings of CK, BW1, IW1, BW2 and IW2 are shown in the table 2.

处理的累积挥发量最高, 为 29.3 kg·hm^{-2}, 占这一时期施氮量的 10.85%; 其次为 BW1 处理, 挥发累积量为 16.77 kg·hm^{-2}; 注射处理 IW1 减排效果显著, 减排率为 60.39%, 而 IW2 处理减排效果较低, 为 24.80%。

BW2 处理的总挥发损失量最高, 为 39.14 kg·hm^{-2}, BW1 次之, 为 24.05 kg·hm^{-2}, IW2 为 14.06 kg·hm^{-2}, IW1 最低, 为 8.43 kg·hm^{-2}, 注射施肥处理比撒施处理的损失量更低。注射施肥处理减排效果显著, 减排率分别为 64.95% 和 41.54%。而节水处理反而会增加氨排放。

2.3　不同处理下表层土壤铵态氮、硝态氮含量和 pH 变化

试验结果表明 (图 3a), CK 处理的土壤铵态氮含量无明显变化。常规灌溉的土壤表层铵态氮大于节水灌溉处理。注射深施 IW1 和 IW2 处理一直维持和 CK 处理相同的波动趋势, 范围为 0~10 mg·kg^{-1}, 这和深施处理下氨挥发速率一致, 均是在 CK 处理附近变化。撒施处理 BW1 和 BW2 土壤铵态氮含量的变化趋势与氨挥发速率一致, 如开花期 (6 月) BW1、BW2 氨挥发在第 1 天达峰值, 其土壤铵态氮也在第 1 天达峰值, 分别为 16.19 mg·kg^{-1} 和 19.36 mg·kg^{-1}。后膨果期撒施处理显著提高土壤铵态氮含量, 其中 BW1 和 BW2 处理分别在施肥后第 3 d 和 2 d 出现累积峰值, 随后逐渐降低, 在施肥后第 7 d 与 CK 处理没有显著差异。

研究表明, CK 处理的表层土壤硝态氮含量不论哪个时期都是最低值, 且无明显变化, 其他处理因为施肥的缘故均随时间有明显的变化。前膨果时期 (图 3b), 撒施处理 BW1、BW2 表层土壤硝态氮含量随着施肥后天数的增加逐渐增大, 注射施肥的变化幅度较小。开花期和后膨果期表层土壤硝态氮含量

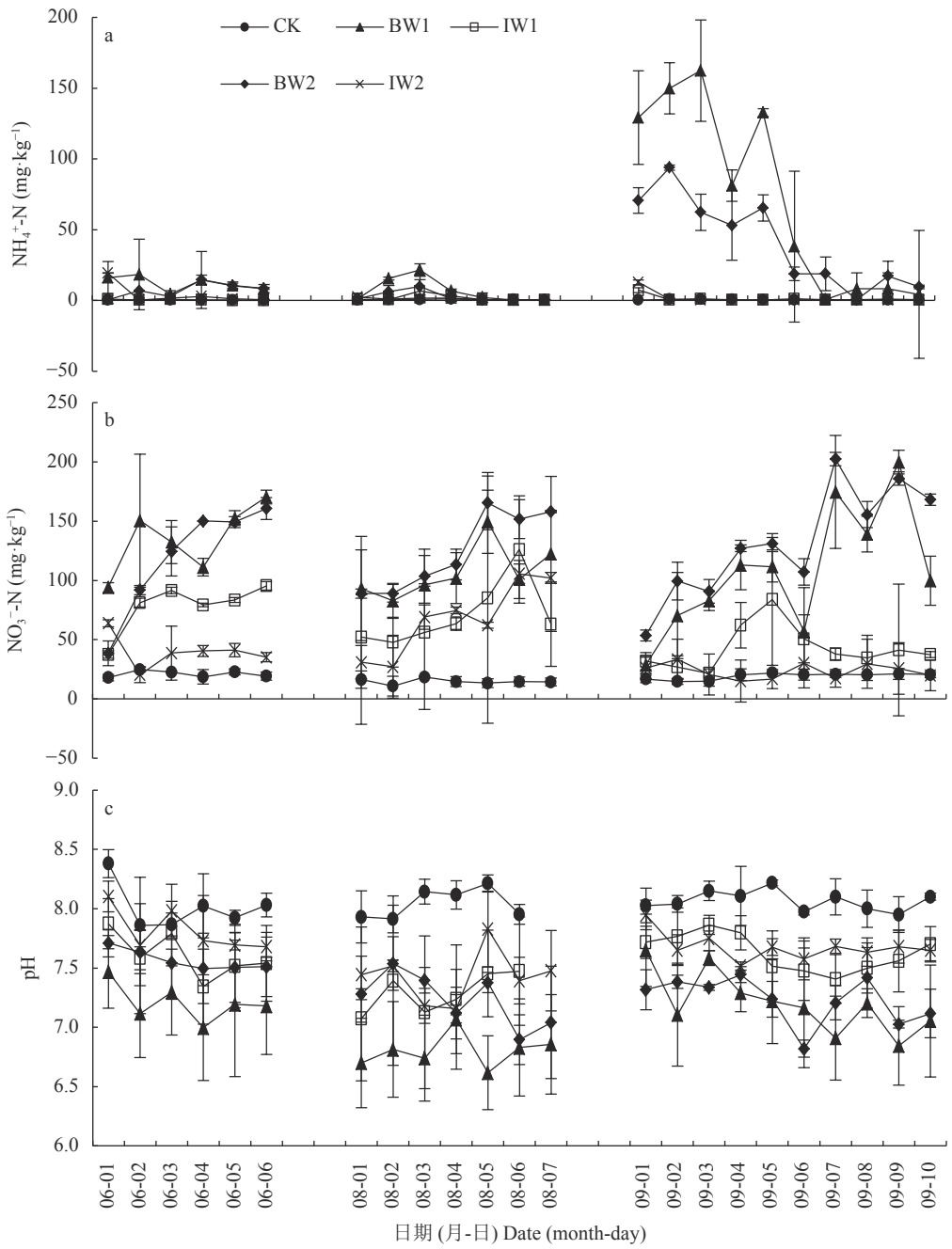

图 3 不同施肥处理下梨园表层土壤不同施肥时期施肥后 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量及 pH 的变化 (6、8、9 月分别为开花期、前膨果期、后膨果期; CK、BW1、IW1、BW2 和 IW2 含义见表 2)

Fig. 3 Changes in NH_4^+-N and NO_3^--N contents and pH of surface soil under different fertilization treatments at different periods (June, August and September show flowering period, pre- and post-expansion periods. The meanings of CK, BW1, IW1, BW2 and IW2 are shown in the table 2)

均随着时间延长有增加的趋势, 且撒施处理大于注射处理。

试验区土壤为碱性土壤, CK 处理的土壤 pH 基本在 8.0~8.5 波动, 为本试验 pH 最大的处理。当肥料施入土壤发生水解时, 会消耗土壤中的 H^+, 使土壤 pH 升高。在大田试验中, 这一过程比较短暂, 较难捕捉, 如图 3c, 在施肥后的前 3 d 有一个短暂上升的过程。在土壤氨挥发后期, 3 个时期的土壤 pH 均有下降的趋势。

2.4 氨挥发期间土壤温度、水分及空气湿度变化

开花期施肥后气温变化明显, 施肥后的 3 d 降到本研究期的最低温度 20.1 ℃, 随后温度上升到 21.3 ℃。两个膨果期均保持在较高的温度, 其中前膨果期在 23.4~24.2 ℃ 间波动变化, 后膨果期在 22~23.5 ℃ 间波动, 且从施肥后的第 5 天开始逐渐降低到 22 ℃ (图 4a)。

土壤水分随时间先升高后逐渐降低, 在 0.25%~0.45% 间波动。其中开花期与后膨果期的两种灌溉水平 W1、W2 的土壤水分差别不大, 而前膨果期的土壤水分表现为 W1>W2 (图 4b)。

空气湿度与土壤温度变化趋势相反, 开花期随时间变化明显, 施肥后第 4 天湿度迅速上升, 达 90%; 前膨果期空气湿度随时间在 60%~80% 之间波动变化; 后膨果期空气湿度在施肥后前 4 d 缓慢下降到 60%, 而后迅速上升到 90% 之后又缓慢下降到 70% (图 4c)。

相关性分析表明 (表 4), 土壤 NH_4^+-N 含量、pH、土壤温度和土壤水分均与氨挥发呈正相关关系, NO_3^--N 含量和空气湿度与氨挥发呈负相关关系。NH_4^+和 NO_3^-(除 IW2 外) 均达到极显著水平 (P<0.01); BW2 处理与土壤水分达显著水平 (P<0.05)。

3　讨论

3.1　不同水肥处理对氨挥发的影响

本研究梨园撒施肥处理 (BW1、BW2) 氨挥发速率峰值均出现在施肥后 1~2 d, 注射处理 (IW1、IW2) 氨挥发速率峰值出现在施肥后的第 1~3 d, 较撒施处理略有延迟且峰值有明显的降低。因为肥料施入土

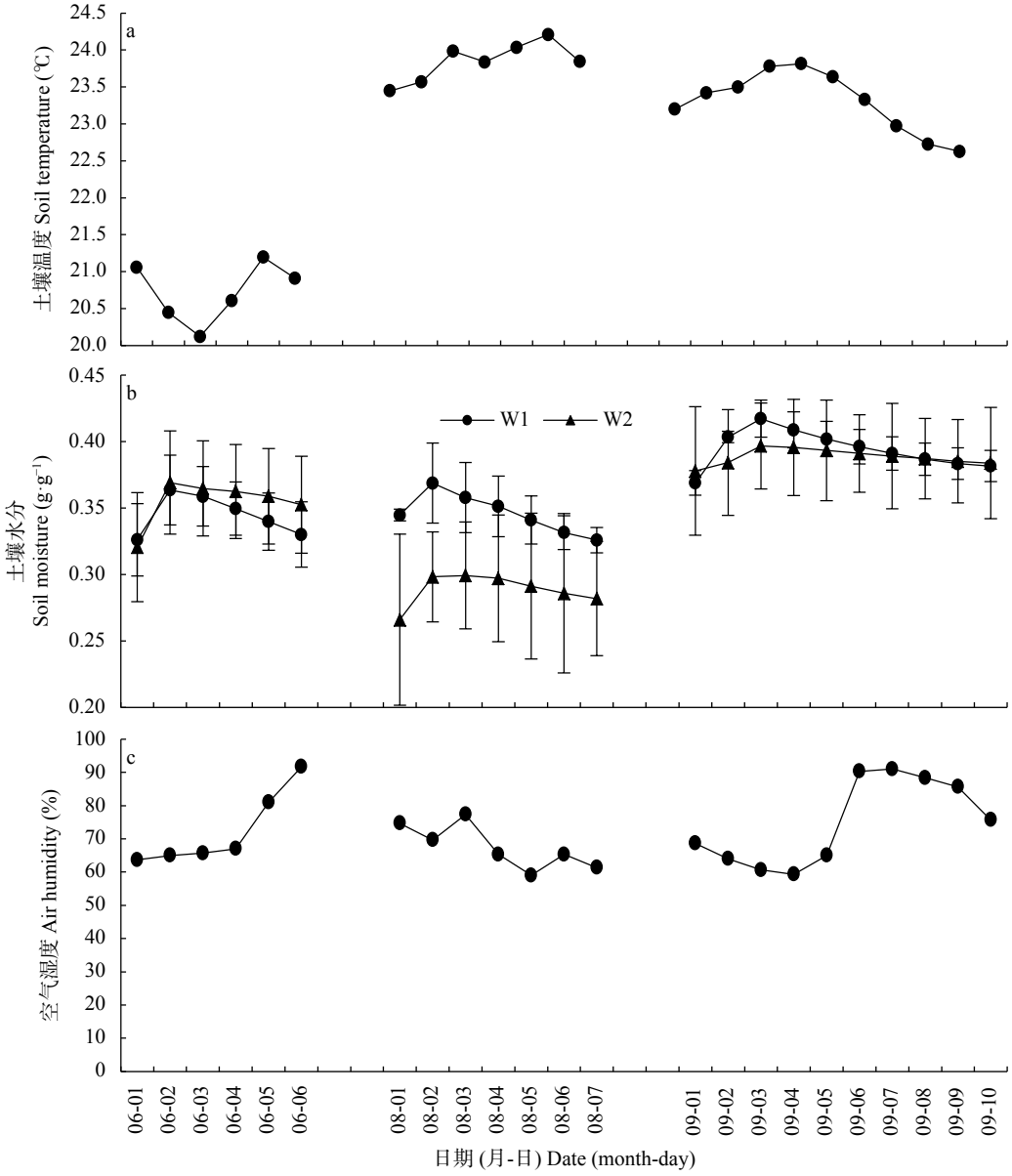

图 4　氨挥发期间土壤温度、土壤水分及空气湿度变化 (图 a、b、c 分别为土壤温度、土壤水分及空气湿度; 6、8、9 月分别为开花期、前膨果期、后膨果期; W1 为常规灌溉, W2 灌水量为常规灌溉的 70%。)

Fig. 4　Changes of soil temperature, soil moisture and air humidity during ammonia volatilization (figure a, b, c show soil temperature, soil moisture and air humidity; June, August and September show flowering period, pre- and post-expansion period. W1 means conventional irrigation; W2 means 70% conventional irrigation.)

表 4 不同施肥处理下梨园土壤氨挥发与各个因素的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of ammonia volatility under different fertilization treatments and factors

处理 Treatment	NH_4^+	NO_3^-	pH	土壤温度 Soil temperature	空气湿度 Air humidity	土壤水分 Soil moisture
BW1	0.531**	−0.668**	0.379	0.144	−0.250	0
IW1	0.639**	−0.447**	0.250	0.224	−0.208	0.226
BW2	0.871**	−0.474**	0.019	0.278	−0.193	0.469*
IW2	0.409	−0.251	0.242	0.213	−0.181	0.276

*、**分别表示线性相关系数达显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)水平。*, ** represent significant correlation of the linear coefficient at P<0.05 and P<0.01 level, respectively.

壤后迅速水解为铵态氮, 致使氨挥发大量产生[21], 而注射施肥可以延迟土壤表面铵态氮浓度的升高, 因此注射施肥能延迟氨挥发的产生, 并能明显降低氨挥发的峰值, 与前人[18]研究一致。后膨果期土壤氨挥发速率的最大值 (7.5 kg·hm^{-2}·d^{-1}), 是开花期土壤挥发高峰期速率的 6 倍, 这是由于后膨果期 (270 kg·hm^{-2}) 的施氮量是开花期 (168 kg·hm^{-2}) 的 2 倍。可见施肥量与施肥时期是影响土壤氨挥发的重要因素[22]。

当施肥方式一致时, 节水灌溉处理 (BW2、IW2) 土壤氨挥发速率均比常规灌溉处理 (BW1、IW1) 的土壤氨挥发速率大。造成这种现象的原因是灌水量的减少导致肥料在表层土壤累积, 未能随着水分运移到深层土体并被根系吸收, 尿素在土壤表面快速水解, 从而造成土壤氨挥发速率增大; 另一个原因是, 灌水量的减少, 土壤湿度、含水量相比常规灌溉会更快地降低, 土壤溶液中 NH_4^+浓度增大, 有利于氨气向空气中扩散, 进而造成土壤氨挥发速率增大。这与董文旭等[23]的研究结果一致, 即在土壤含水量较高时, 铵态氮含量不是氨挥发的主导因素, 而水分是主要控制因素。

本研究结果表明, 根际注射施肥可显著降低氨挥发损失累积量, 其减排率为 60% 以上。各处理氨挥发损失量分别为 BW1 24.05 kg·hm^{-2}、IW1 8.43 kg·hm^{-2}、BW2 39.14 kg·hm^{-2} 和 IW2 14.06 kg·hm^{-2}, 分别占肥料的 3.03%、1.06%、4.94% 和 0.17%。果园传统管理方式 (BW1) 氨挥发损失率为 1.44%~6.21% (平均 4.23%), 这与孙瑞峰等[22]和朱志军[24]在对苹果氮肥氨挥发损失率的研究结果基本一致。Yao 等[25]在水稻 (*Oryza sativa*) 田的研究表明, 尿素深施处理的氨挥发通量和氨挥发损失率分别比表施处理下降 91% 和 92%。本研究没有达到 90% 的减排率, 因为南北方土壤酸碱度等土壤理化性质的不同, 氨挥发量一般是稻田高于旱地, 减排效果稻田要比旱地效果较优[26]。Abascal 等[27]在橄榄 (*Canarium album*) 果园使用与深埋机相结合的堆肥试验中发现, 只有少量的氮 (7% 的施氮量) 流失到大气中, 深埋施肥以限制氨挥发是提高肥料效率的有效方法。本研究中注射施肥处理氮损失量占施氮量的 2%~5%, 相比深埋堆肥试验减排效果较优。Sanz-Cobena 等[28]研究了两种不同的猪粪施用技术 (即地面撒施和浅层注射) 对西班牙中部土壤氨挥发的影响, 结果表明与地面施用相比, 浅层注入猪粪水的总氨排放量减少了 46%~81%。而本研究注射施肥的最高减排率为 64.95%, 相比 Sanz-Cobena 等[28]减排效果略有降低, 可能是因为有机质分解大量有机酸形成腐殖质, 抑制 pH 升高, 从而显著抑制了土壤氨挥发[29]。水分是淋失的主要驱动因子, 由于土壤胶体对 NO_3^--N 吸附能力比较弱, 液体肥施用后紧接着的灌溉会导致氮淋溶到更深的土层[30]。本研究中的节水灌溉与注射施肥相结合的 IW2 处理可以解决由于果树需水量大而引起的氮淋失的矛盾。有研究表明, 大田内非饱和土和饱和土的氨损失不同[28,31], 所以应考虑当地的天气和土壤条件, 以最大限度地发挥其减排潜力, 同时也尽量减少温室气体排放或淋溶的潜在负面影响。

3.2 土壤理化性质与气象因素对梨园氨挥发的影响

土壤氨挥发受多种因素的综合影响, 而土壤表层中铵态氮含量是影响氨挥发速率的主要因素[32]。本试验证明注射施肥能显著降低土壤表层铵态氮的含量。肥料施入土壤在酶的作用下迅速水解为铵态氮, 使土壤表面铵态氮含量迅速升高, 注射施肥使肥料在深层次土壤中水解, 使 IW1 和 IW2 处理表层铵态氮含量较低。本试验相关性分析表明, 氨挥发与铵态氮含量呈正相关, 除 IW2 处理外均达极显著水平 (P<0.01)。丁阔[14]在新疆库尔勒梨园的研究表明, 土壤表层铵态氮含量与氨挥发呈极显著正相关, 与本试验研究结果一致。本研究发现, 氨挥发速率峰值变化与土壤表层铵态氮含量峰值变化并不完全一致, 吴萍萍等[33]研究发现, 铵态氮含量与氨挥发速率并不完全对应, 日氨挥发量还受其他因素影响。研究表明, 土壤表面硝态氮含量变化与氨挥发速率和铵态氮含量变化相反。注射处理较撒施处理土壤表层硝态氮含量变化峰值低, 说明注射处理能有效降低土壤表层硝态氮含量。相关分析表明, 氨挥发速率与硝态氮含量呈负相关, 除 IW2 处理外, 其余均呈

极显著相关关系 (P<0.01)。本研究各处理中只有 IW2 处理氨挥发速率与土壤表层硝态氮铵态氮含量相关性不显著, 原因可能一是注射施肥通过施肥深度来降低土壤表层氮的含量, 阻隔了氨气释放到大气中; 二是灌溉量的减少导致离子向上运动缺乏水分驱动, 使营养元素更好地保留在根部土壤中[31]。

氨挥发期间, pH 变化与氨挥发速率变化不一致且变化复杂。当肥料施入土壤发生水解时, 会消耗土壤中的 H^+, 使土壤 pH 升高[34]。在土壤氨挥发后期, 3 个施肥时期的土壤 pH 均有下降的趋势, 这是由于土壤铵态氮在形成氨气和发生硝化反应时均会产生 H^+, 使得土壤 pH 下降, 也因此后期氨挥发速率降低。注射施肥土壤 pH 值较撒施处理变化幅度较小, 说明注射施肥可以有效降低土壤表层 pH 变化。土壤表面 pH 与氨挥发进行相关分析, 结果表明, 氨挥发与 pH 呈正相关。前人[35] 研究表明, 氨挥发速率与 pH 存在正相关关系, 与本试验结果一致。

田间降雨、温度、光照和风速都会影响土壤氨挥发[36]。在华北平原 7—8 月是多雨季, 大田试验氨挥发受降雨的影响较大, 主要影响土壤温度与水分的变化。BW1 和 BW2 处理在第 1 天达到本追肥时期氨挥发速率最大值, 而第 2 天氨挥发速率出现明显下降, 这是由于在试验区的第 2 天出现了降雨, 影响了土壤铵态氮转化为氨气的速率。施肥后的第 3 天气温回升, 太阳辐射也随之增大, 湿度降低 (图 4), 这些因素促进肥料水解为铵态氮, 土壤中铵态氮的比例增加, 所以施肥后的第 3 天 BW1 和 BW2 处理氨挥发出现二次峰值[37]。相关性分析表明, 氨挥发与土壤温度和土壤水分均呈正相关关系, 与空气湿度呈负相关关系[38]。本研究中氨挥发与土壤温度和空气湿度相关性不显著, 说明二者对氨挥发有影响, 但并非主导因子。

4　结论

在河北晋州市果园, 采用根际注射与节水灌溉相结合的管理方法, 能够有效地降低氨挥发的排放。与当地常用的管理方法相比, 根际注射施肥减排率分别达 64.95% (IW1) 和 41.54% (IW2), 且注射处理氨挥发受灌溉量影响比撒施处理受灌溉量影响较小。综上所述, 在果园种植业中, 注射施肥+节水灌溉是减少氨素损失的有效措施之一。

参考文献　References

[1] 康金花, 黄子蔚. 滴灌随水施肥对土壤有效氮动态的影响[J]. 干旱区研究, 2005, 22(2): 270−273
KANG J H, HUANG Z W. Effect of fertilization through drip irrigation systems on available nitrogen dynamics in the different soillayers[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(2): 270−273

[2] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501−1514
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects onagro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501−1514

[3] BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Estimation of global NH_3 volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(2): 1−14

[4] 钱晓雍, 郭小品, 林立, 等. 国内外农业源NH_3排放影响$PM_{2.5}$形成的研究方法探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 1908−1914
QIAN X Y, GUO X P, LIN L, et al. Research methods for agriculturally emitte dammonia effects on formation of fine particulate matter ($PM_{2.5}$): a review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 1908−1914

[5] ERISMAN J W, SCHAAP M. The need for ammonia abatement with respect to secondary PM reductions in Europe[J]. Environmental Pollution, 2004, 129(1): 159−163

[6] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153−226

[7] 许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制$PM_{2.5}$污染的敏感性研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2482−2491
XU Y L, XUE W B, LEI Y, et al. Sensitivity analysis of $PM_{2.5}$ pollution to ammonia emission control in China[J]. China Environmental Science, 2017, 37(7): 2482−2491

[8] 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 Q, LI L X, LI H Y, 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

[9] RATTANAMANEE A, NIAMSUP H, SRISOMBAT L O, et al. Role of chitosan on some physical properties and the urea controlled release of the silk fibroin/gelatin hydrogel[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2015, 23(3): 334−340

[10] 李彩霞, 周新国, 强小嫚, 等. 不同水分处理下液体地膜覆盖玉米田土壤环境与产量效应[J]. 玉米科学, 2010, 18(3): 108−112
LI C X, ZHOU X G, QIANG X M, et al. Effects of liquid film mulching on soil moisture, temperature and yield of summer maize field under different water conditions[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(3): 108−112

[11] 李哲, 屈忠义, 任中生, 等. 河套灌区滴灌施肥对土壤氨挥发及玉米氮肥利用率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 37−42

LI Z, QU Z Y, REN Z S, et al. Nitrogen use efficiency and ammonia oxidation of corn field with drip irrigation in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 37−42

[12] 张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1194−1201
ZHANG C, LI X Q, SU F, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(6): 1194−1201

[13] 李霞. 浅谈果树种植结构的调整与优化[J]. 种子科技, 2020, 38(24): 85−86
LI X. Adjustment and optimization of fruit tree planting structure[J]. Seed Science & Technology, 2020, 38(24): 85−86

[14] 丁阔. 库尔勒香梨树体-土壤体系氮素循环特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016
DING K. Research on the characteristics of nitrogen cycling in Korla fragrant pear tree-soil system[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016

[15] 章伟. 渭北旱塬苹果及葡萄水肥一体化技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
ZHANG W. Application of fertigation in apple and grape orchard in Weibei arid plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016

[16] 吴小宾, 彭福田, 崔秀敏, 等. 施肥枪施肥对桃树氮素吸收分配及产量品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 680−687
WU X B, PENG F T, CUI X M, et al. Effects of fertilization with a fertilizer applicator on nitrogen absorption and distribution, and fruit yield and quality of peach[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 680−687

[17] 吕丽霞, 张立新, 高梅, 等. 根际注射施肥对渭北苹果园土壤理化特性、土壤酶、果实产量及品质的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(5): 782−788
LYU L X, ZHANG L X, GAO M , et al. Effect of fertilization with injection to the rhizosphere on soil physical and chemical properties, soil enzyme activities and yield and quality of apple in Weibei highland[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(5): 782−788

[18] 张林森, 李雪薇, 王晓琳, 等. 根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 421−430
ZHANG L S, LI X W, WANG X L, et al. Effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 421−430

[19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205−209
WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205−209

[20] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 135−141
WANG W Y, DONG W X, CHEN S Y, et al. Effect of continuously appling controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S2): 135−141

[21] ENGEL R, LIANG D L, WALLANDER R, et al. Influence of urea fertilizer placement on nitrous oxide production from a silt loam soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(1): 115−125

[22] 孙瑞峰, 马娟娟, 郭向红, 等. 蓄水坑灌下追肥时期对果园土壤氨挥发的影响[J]. 节水灌溉, 2019, (10): 1−5
SUN R F, MA J J, GUO X H, et al. Effects of topdressing period on ammonia volatilization in orchard soil under water storage pit irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2019, (10): 1−5

[23] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1115−1121
DONG W X, WU D M, HU C S, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1115−1121

[24] 朱志军. 渭北苹果园施肥制度对氨挥发和温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
ZHU Z J. Effects of fertilization system on ammonia volatilization and greenhouse gas emission in Weibei apple orchard[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019

[25] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 254−266

[26] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149−162
LU L L, WU G Y. Research progress on influencing factors of ammonia emission in farmland[J]. Journal of Agricultural University of China, 2019, 24(1): 149−162

[27] ABASCAL S A . Nitrogen loss by ammonia volatilization in cultivation of olive orchards fertilized with compost[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(10): 1207−1213

[28] SANZ-COBENA A, MISSELBROOK T H, HERNAIZ P, et al. Impact of rainfall to the effectiveness of pig slurry shallow injection method for NH_3 mitigation in a Mediterranean soil[J]. Atmospheric Environment, 2019, 216(1): 116913

[29] ZHOU J, LI B, XIA L, et al. Organic-substitute strategies reduced carbon and reactive nitrogen footprints and gained net ecosystem economic benefit for intensive vegetable production[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 984−994

[30] 李硕, 王选, 张西群, 等. 猪场肥水施用对玉米-小麦农田氨排放、氮素利用与表观平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1502−1514
LI S, WANG X, ZHANG X Q, et al. Effects of swine slurry application on ammonia emission, nitrogen utilization and apparent balance of a winter wheat-summer maize rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10):

1502−1514

[31] RECIO J, VALLEJO A, LE-NOË J, et al. The effect of nitrification inhibitors on NH_3 and N_2O emissions in highly N fertilized irrigated Mediterranean cropping systems[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 427−436

[32] ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea?[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635−1642

[33] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85−93
WU P P, LIU J J, YANG X X, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(1): 85−93

[34] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2102−2112
HUANG S Y, TIAN C, XIE G X, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(12): 2102−2112

[35] 徐婷婷, 宋鹏慧, 闫暮春, 等. 改性尿素施用对氨挥发量及无机氮变化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 29−33
XU T T, SONG P H, YAN M C, et al. Effect of modified urea on ammonia volatilization and soil in organic nitrogen[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (5): 29−33

[36] MOHAMMED-NOUR A, AL-SEWAILEM M, EL-NAGGAR A H. The influence of alkalization and temperature on ammonia recovery from cow manure and the chemical properties of the effluents[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2441

[37] 山楠, 毕晓庆, 杜连凤, 等. 基施氮肥对麦田冬前氨挥发损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (6): 47−51
SHAN N, BI X Q, DU L F, et al. Effect of basal nitrogen fertilization on corn field ammonia volatilization loss ahead of winter in-site conditions[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (6): 47−51

[38] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1449−1457
ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(6): 1449−1457