

施氮量对库尔勒香梨园氨挥发和 氧化亚氮排放的影响

王 成¹, 陈波浪^{1,2}, 玉素甫江·玉素音^{1,2}, 王前登¹, 柴仲平^{1,2}

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 为了解库尔勒香梨园土壤氮素气态损失, 采用密闭式集气法和静态箱气相色谱法对不同氮肥用量下的土壤氨挥发和氧化亚氮排放进行研究, 并设置了 5 个处理: 不施肥 ($N_0P_0K_0$)、不施氮肥 (N_0PK)、施氮 $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1PK)、施氮 $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2PK)、施氮 $450\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_3PK)。结果表明: 氨挥发速率和氧化亚氮排放通量均在施基肥和施追肥后第 4 天出现峰值和次峰值, 且氨挥发速率和氧化亚氮排放通量均随着施氮量的增加而增大; 各处理氨挥发累积量达到 $27.886 \sim 44.416\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 施氮处理氨挥发净损失量达到 $6.726 \sim 16.197\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 各处理氧化亚氮累积量达到 $341.616 \sim 531.960\text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 施氮处理氧化亚氮净损失量达到 $90.452 \sim 185.412\text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 氨挥发累积量和净损失量与氧化亚氮累积量和净损失量均随着施氮量的增加而增加; 施氮处理氨挥发净损失率为 $2.720\% \sim 4.480\%$, 氧化亚氮净损失率为 $0.038\% \sim 0.060\%$, 氨挥发和氧化亚氮净损失率随着施氮量的增加均表现为先减小再增大; 施用氮肥能显著增加 $0 \sim 20\text{ cm}$ 和 $20 \sim 40\text{ cm}$ 土层中铵态氮和硝态氮含量; 相关分析表明, 氨挥发速率和氧化亚氮排放通量与施氮量和土壤温度呈极显著正相关关系; N_2PK 处理的库尔勒香梨产量最高, 达到 $6\,213.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且氨挥发净损失率和氧化亚氮净损失率均最小, 为 2.720% 和 0.038% 。从库尔勒香梨园土壤氮素气态损失和生产角度看, 纯氮用量为 $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时最佳。

关键词: 氨挥发; 氧化亚氮排放; 氮肥; 库尔勒香梨;

中图分类号: S661.2; S158.5 **文献标志码:** A

Effect of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrous oxide emission in Korla fragrant pear orchard

WANG Cheng¹, CHEN Bo-lang^{1,2}, Yusufjiang · Yusuyin^{1,2}, WANG Qian-deng¹, CHAI Zhong-ping^{1,2}

(1. College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agriculture University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Process, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: To understand the nitrogen (N) loss of soil N in the Korla fragrant pear orchard, in this study, the methods of closed gas gathering and the static box-gas chromatography were used to study the soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission under different N fertilizer rates. Five treatments were set including no fertilization ($N_0P_0K_0$), no N application (N_0PK), N application $150\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_1PK), N application $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_2PK), N application $450\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_3PK). The results showed that both ammonia volatilization rate and nitrous oxide emission flux peaked on the 4th day after application of base fertilizer and top dressing, the ammonia volatilization rate and nitrous oxide emission flux increased with increasing the N application rate. The cumulative amount of ammonia volatilization among the different treatments reached $27.886 \sim 44.416\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the net loss of ammonia volatilization with N application treatments reached $6.726 \sim 16.197\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the cumulative amount of nitrous oxide among the different treatments reached $341.616 \sim 531.960\text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the net loss of nitrous oxide with N application treatments reached $90.452 \sim 185.412\text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the accumulation of ammonia

收稿日期: 2018-10-15

修回日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460548); 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目 (2017D01A38); 新疆维吾尔自治区青年科技创
新人才培养工程 (QN2016YX0670)

作者简介: 王成 (1995-), 男, 新疆阿拉尔人, 硕士研究生, 研究方向为果树营养与施肥。E-mail: 2628715074@qq.com

通信作者: 柴仲平 (1974-), 男, 新疆玛纳斯人, 教授, 研究方向为果树营养与施肥。E-mail: chaizhongpingth@sina.com

volatilization and the net loss, the cumulative amount of nitrous oxide and the net loss all increased with increasing the nitrogen application rate, the net loss rate of ammonia volatilization with nitrogen application treatments was 2.720%~4.480%, the net loss rate of nitrous oxide was 0.038%~0.060%, the net loss rate of ammonia volatilization and nitrous oxide both showed a tendency to decrease first and increase later with increasing the amount of N applied. Application of N fertilizer could significantly increase the content of ammonium N and nitrate N in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers. Correlation analysis showed that ammonia volatilization rate and nitrous oxide emission flux were significantly positively correlated with N application rate and soil temperature. The yield of Korla fragrant pear treated with N₂PK reached 6 213.5 kg·hm⁻², which was the highest. But, the net loss rate of ammonia volatilization and nitrous oxide were the smallest, which were 2.720% and 0.038%, respectively. From the perspective of N loss in the soil and production in Korla fragrant pear orchard, the optimum amount of pure N was 300 kg·hm⁻².

Keywords: ammonia volatilization; nitrous oxide emission; nitrogen fertilizer; korla fragrant pear

据统计,2016 年我国氮肥施用量已达到 2.31×10^7 t,是世界上主要的氮肥消费国^[1]。在现阶段农户的管理水平下,我国氮肥损失率高达 40%~50%,减少氮肥损失、提高氮肥有效率,仍然是我国今后农业生产中需要解决的问题^[2]。施入农田土壤中的氮素一部分会被作物吸收利用,而其余部分则会随水下渗至土层深处或以氨、氧化亚氮、一氧化氮等气态形式进入大气,造成氮肥资源浪费和生态环境恶化等问题^[3-4]。其中,氨挥发是土壤氮素以气态形式损失的重要途径之一^[5],通过这一途径损失的氮肥量已达到全球氮肥施入量的 1%~47%^[6]。挥发的氨会与大气中的酸性物质发生反应生成铵盐,经干沉降、降雨等方式回归自然生态系统,从而引起土壤酸化和地表水污染等环境问题^[7-8]。氧化亚氮的排放虽不是氮肥损失的主要途径,但过量施用氮肥,将会造成氧化亚氮排放量的增加并对环境产生负面影响^[9]。氧化亚氮会破坏大气臭氧层,引起臭氧空洞,其单分子增温潜势是二氧化碳的 265 倍,甲烷的 23 倍,在大气中的存留时间长达 150 a 左右,属于痕量气体^[10-11]。据估计,在农田土壤中由于大量施用氮肥而直接产生的氧化亚氮排放量达到了全球氧化亚氮排放总量的 36%左右^[12]。

氮素气态损失所产生的大量氨和氧化亚氮等气体已对社会经济和生态环境造成了诸多负面影响,因此近年来许多学者对氨挥发和氧化亚氮的排放展开了研究。李鑫等^[8]研究发现,肥料在撒施后翻耕和条施后覆土能有效减少土壤氨挥发和氧化亚氮排放。马银丽等^[13]研究结果表明,冬小麦-夏玉米轮作体系中的氨挥发和氧化亚氮排放净损失量达到了施氮量的 3.17%~5.80% 和 0.04%~0.23%。王建等^[14]研究发现,使用袋控肥能使土壤氨挥发和氧化亚氮累积排放量减少 52.17%~59.70% 和 48.57%~49.50%,土壤氮素损失减少

56.04%。当前我国对农田氨挥发和氧化亚氮排放的研究多集中于水稻、小麦和玉米等粮食作物,但对梨尤其是库尔勒香梨等果树的研究较少。库尔勒香梨在新疆已具有相当大的种植面积和产量,是新疆畅销国内外重要的农产品之一^[15]。因此本试验以 6 a 生库尔勒香梨为研究对象,在不同氮肥用量基础上,在库尔勒香梨整个年生育期内,对库尔勒香梨园土壤氨挥发和氧化亚氮排放展开原位研究,以期减少库尔勒香梨园氮素气态损失、确定适宜施氮量、提高氮素利用率和保护库尔勒香梨园生态环境提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在新疆维吾尔自治区库尔勒市境内恰尔巴格乡和什巴格村 5 队(41°48'21"N、86°04'22"E)进行,该区属暖温带大陆性干旱气候,海拔 918.7 m,年平均气温 10.5~11.8℃,≥10℃ 的年平均积温 4 278℃,年无霜期 175~225 d,年均日照时数 2 762.1~3 168 h,多年平均降雨 50~55 mm,干燥度 39.6~63.3。供试土壤为黄潮土,pH 7.9,有机质含量 21.56 g·kg⁻¹,碱解氮含量 46.22 mg·kg⁻¹,有效磷含量 14.41 mg·kg⁻¹,速效钾含量 169 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

选用嫁接砧木为杜梨(*Pyrus betulifolia* Bge.)的 6 a 生库尔勒香梨树为试材,对树形相近、生长健壮的库尔勒香梨树挂牌标记。设置不施肥(N₀P₀K₀)、不施氮(N₀PK)、低氮量(N₁PK)、中氮量(N₂PK)和高氮量(N₃PK)5 个氮肥用量处理。氮肥选用尿素(含 N 46%),磷肥选用重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%),钾肥选用硫酸钾(含 K₂O 51%),具体氮肥施用量详见表 1。每个处理选取 6 棵香梨树,3 次重复,植株行距 5 m×6 m,田间小区进行随机排列,试验区面积

为 2 400 m³。在库尔勒香梨整个年生育期(4-9 月)内施肥 2 次,灌水 5 次。第 1 次在香梨树萌芽前期(4 月 1 日)基施氮肥用量的 60%(N₀P₀K₀和 N₀PK 除外)和磷、钾肥(N₀P₀K₀除外)的全部,第 2 次在果实膨大前期(6 月 1 日)追施氮肥用量的 40%,施肥方式采用沟施。灌水在 4—8 月的每月 10 日进行,共计 5 次,灌水用量每次 3 000 m³·hm⁻²,灌溉采用漫灌。其他田间管理措施与当地一致。

表 1 不同氮肥施用量的试验方案

处理 Treatment	每公顷的养分用量/(kg·hm ⁻²) Amount of applying nutrient per hectare		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
N ₀ PK	0	300	60
N ₁ PK	150	300	60
N ₂ PK	300	300	60
N ₃ PK	450	300	60

1.3 样品采集与测定

1.3.1 氨气的采集与测定 氨气的田间原位采集采用密闭式集气法。采集装置用聚氯乙烯硬质塑料制成,呈圆柱状,内径 16 cm,高 40 cm。内部放有容积为 50 mL 的蒸发皿,用铁丝支架架起,离地高 15 cm。蒸发皿中加入 2%的硼酸溶液 20 mL,吸收一段时间内土壤挥发的氨气。顶部罩一硬质料管盖,盖紧密封。在距离单株树体施肥位置的 10~20 cm 处,放置 3 个采集装置,于 4-9 月每月 5、15、25 日的早上(8:00-12:00)、中午(12:00-16:00)、下午(16:00-20:00)和夜间(20:00-8:00)对样品进行采集。采集时将蒸发皿中的硼酸全部倒入 125 mL 塑料瓶中,用蒸馏水将蒸发皿润洗 3 遍并将润洗液也一并倒入塑料瓶。密封塑料瓶,带回实验室测定。测定时用[H⁺]浓度为 0.005 mol·L⁻¹的硫酸溶液进行滴定。

(1)计算土壤中氨挥发速率公式为:
氨挥发速率(kg·hm⁻²·d⁻¹)NH₃-N=[M/(A·D)]
式中,M 为密闭法单个装置平均每次测的氨量(NH₃-N,kg);A 为捕获装置的截面积(hm²);D 为每次连续捕获的时间(h)^[16]。

(2)氨挥发累积量 = Σ(氨挥发速率 × 每次连续采集的时间)

(3)氨挥发净损失率=(施氮处理氨挥发累积量-不施氮处理氨挥发累积量)/施肥量×100%^[17]

1.3.2 氧化亚氮的采集与测定 氧化亚氮的田间原位收集采用密闭式静态箱法。采集装置呈圆柱

状,内径 26 cm,高 40 cm,材料为聚氯乙烯硬质塑料。装置内装有 1 个空气搅拌风扇用以混均箱内气体,装置顶部设有 1 个气体采集口。在 4-9 月每月 5、15、25 日的早上(8:00-12:00)、中午(12:00-16:00)、下午(16:00-20:00)和夜间(20:00-8:00)采集氧化亚氮。每个样点设置 3 个采集装置。采集气体时将采集装置放在底座边缘的凹槽中,加水密封。每隔 15、30、45、60 min 使用带有气体链接阀的 50 mL 针筒抽取气体,置于真空铝箔采气袋中,并用水银温度计记录此时桶内空气温度。气袋带回实验室用气相色谱仪(Agilent7890A,Agilent,PaloAlto,USA)进行测定。测定条件为检测器(ECD)温度为 300℃,分离柱温度为 55℃,高纯氮气为载气,流量为 30 mL·min⁻¹。

(4)氧化亚氮排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中,F 为氧化亚氮排放通量(g·hm⁻²·h⁻¹);ρ 为标准状态下氧化亚氮的密度(1.98 kg·m⁻³);V 为密闭箱内有效空间体积(m³);A 为密闭箱覆盖的地面面积(m²);Δc/Δt 为在特定时间内的氧化亚氮浓度变化速率;T 为采样时密闭箱的温度(℃)^[18]。

(5)氧化亚氮净损失率=(施氮处理氧化亚氮累积量-不施氮处理氧化亚氮累积量)/施氮量×100%

1.3.3 土样的采集与测定 每次收集气体后,用土钻采集 0~40 cm 处的土壤样品。每 20 cm 土层采集 2 份土壤样品,分别用于测定土壤硝态氮和铵态氮的含量。土壤样品采集后立即装入带有冰水的冷冻箱,带回实验室用 2 mol·L⁻¹的 KCl 溶液浸提(水土比 10:1),并同时测定其土壤含水量,将浸提液冷冻保存备用。解冻后再使用连续流动分析仪(CFA,TRAACS2000)测定浸提液中硝态氮和铵态氮的含量。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 进行数据处理,SPSS 17.0 进行方差分析和单因素多重比较(LSD)。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥用量下土壤氨挥发和氧化亚氮排放变化

2.1.1 氨挥发速率 库尔勒香梨园年生育期氨挥发速率变化如图 1 所示,各处理氨挥发速率整体趋势变化相似,均随着时间的推进而逐渐减小。施氮处理(N₁PK、N₂PK、N₃PK)氨挥发速率波动式降低,

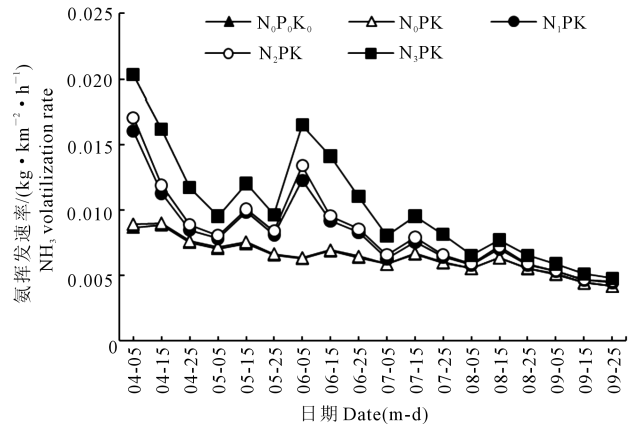


图 1 不同处理氨挥发速率动态变化

Fig.1 Dynamic change of ammonia volatilization rate in different treatments

在 $0.004 \sim 0.020 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间变化,不施氮处理 ($\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$ 、 N_0PK) 则缓慢平稳降低,在 $0.004 \sim 0.009 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间变化。施氮处理氨挥发速率明显大于不施氮处理, N_3PK 处理氨挥发速率明显大于其他各处理, $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$ 和 N_0PK 处理间、 N_1PK 和 N_2PK 处理间氨挥发速率变化不明显。 N_1PK 、 N_2PK 、 N_3PK 均在施基肥后的第 4 天 (4 月 5 日) 达到峰值,分别为 0.016 、 0.017 、 $0.020 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,在施追肥后第 4 天 (6 月 5 日) 达到次峰值,分别为 0.012 、 0.013 、 $0.017 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。说明向土壤中施入氮肥在较短时间 (4 d) 内能增大氨挥发速率。灌水后 (5、7、8 月的 15 日) 各处理的氨挥发速率相比于灌水前 (5、7、8 月的 5 日) 有所增大,说明灌水能促进土壤中氮的挥发,增大氨挥发速率。

2.1.2 氧化亚氮排放通量 从图 2 可以看出,在库尔勒香梨园年生育期内,各处理氧化亚氮排放通量随时间的延长呈现出逐渐减小的趋势。施氮处理氧化亚氮排放通量由于受施肥和灌水的影响在香梨年生育期间呈波动式逐渐降低,幅度范围为 $0.068 \sim 0.207 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不施氮处理氧化亚氮排放通量缓慢平稳降低,幅度范围为 $0.065 \sim 0.098 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在施基肥后的第 4 天 (4 月 5 日), N_1PK 、 N_2PK 、 N_3PK 处理氧化亚氮出现排放高峰,其排放通量达到最大值,分别为 0.157 、 0.173 、 $0.207 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,在追施肥后的第 4 天 (6 月 5 日) 再次出现排放高峰,其排放通量达到较高值,分别为 0.148 、 0.160 、 $0.183 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。施氮处理的氧化亚氮排放通量均显著大于不施氮处理。表明向库尔勒香梨园土壤中施入氮肥能明显增加氧化亚氮的排放,增大氧化亚氮排放通量。在 5、7、8 月的 15 日,各处理的氧化亚氮排放通量较 5、7、8 月的 5 日

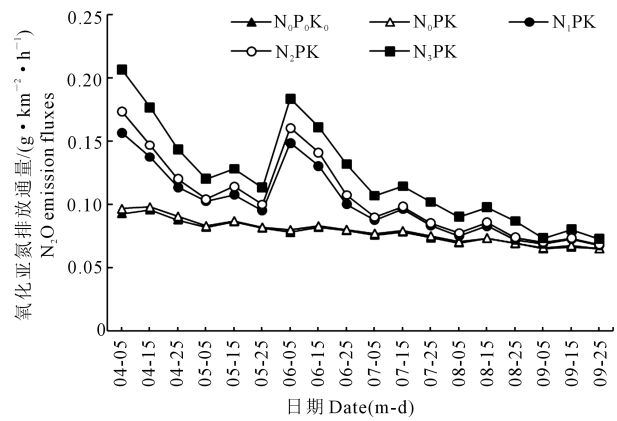


图 2 不同处理氧化亚氮排放通量动态变化

Fig.2 Dynamic change of nitrous oxide emission flux in different treatments

略有增加,表明灌水利于氧化亚氮的排放,使氧化亚氮排放通量增大。

2.2 不同氮肥用量下库尔勒香梨园土壤氮素气态损失及产量变化

2.2.1 氮素气态损失 假设施氮处理土壤内残留氮素的气态损失和不施氮处理相等,那么施氮处理中来自肥料氮素的气态损失可与不施氮处理氮素气态损失的差值来估算^[13]。从表 2 可知,在库尔勒香梨年生育期内,各处理氨挥发累积量达到 $27.886 \sim 44.416 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;施氮处理氨挥发净损失量为 $6.726 \sim 16.197 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,净损失率为 $2.720\% \sim 4.480\%$;各处理氧化亚氮排放累积量达到 $341.616 \sim 531.960 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;施氮处理氧化亚氮净损失量为 $90.452 \sim 185.412 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,净损失率为 $0.038\% \sim 0.060\%$ 。各处理氨挥发累积量明显大于氧化亚氮排放累积量,施氮处理氨挥发净损失量和净损失率均明显大于氧化亚氮净损失量和净损失率。 N_3PK 处理的氨挥发和氧化亚氮排放累积量均显著大于其他各处理, N_1PK 、 N_2PK 处理间氨挥发和氧化亚氮排放累积量均无显著差异。各处理氨挥发和氧化亚氮排放累积量随着施氮量的增加而增加,均表现为 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0 < \text{N}_0\text{PK} < \text{N}_1\text{PK} < \text{N}_2\text{PK} < \text{N}_3\text{PK}$ 。施氮处理氨挥发和氧化亚氮排放净损失量随着施氮量的增加而增加,均表现为 $\text{N}_1\text{PK} < \text{N}_2\text{PK} < \text{N}_3\text{PK}$ 。随着施氮量的增加,施氮处理氨挥发和氧化亚氮排放净损失率均先减小后增大,表现为 $\text{N}_2\text{PK} < \text{N}_3\text{PK} < \text{N}_1\text{PK}$ 。 N_2PK 的氨挥发和氧化亚氮排放净损失率均最低,分别为 2.720% 和 0.038% 。

2.2.2 库尔勒香梨产量 由表 3 可知,各处理库尔勒香梨产量为 $692.4 \sim 6213.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮处理的库尔勒香梨产量显著大于不施氮处理, N_2PK 、 N_3PK 处理间库尔勒香梨产量无显著差异。各处理

表 2 不同氮肥用量下库尔勒香梨园土壤氮素气态损失

Table 2 Nitrogen loss of soil N in Korla fragrant pear orchard under different N fertilizer						
处理 Treatment	NH ₃			N ₂ O		
	累积量 Accumulation	净损失量 Net loss	净损失率 Net loss	累积量 Accumulation	净损失量 Net loss	净损失率 Net loss
	/(kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	/(kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	rate/%	/(g · hm ⁻² · a ⁻¹)	/(g · hm ⁻² · a ⁻¹)	rate/%
N ₀ P ₀ K ₀	27.886±0.84c	—	—	341.616±3.27c	—	—
N ₀ PK	28.219±0.78c	—	—	346.548±3.15c	—	—
N ₁ PK	34.944±1.06b	6.726	4.480	437.000±4.02b	90.452	0.060
N ₂ PK	36.376±0.92b	8.157	2.720	459.748±3.76b	113.200	0.038
N ₃ PK	44.416±1.09a	16.197	3.600	531.960±4.08a	185.412	0.041

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note:Different letters in the same column indicate the significant difference among treatments($P<0.05$). The same below.

库尔勒香梨产量高低表现为 N₀P₀K₀<N₀PK<N₁PK<N₃PK<N₂PK,N₂PK 和 N₃PK 的库尔勒香梨产量较 N₁PK 分别增产 86.77%和 76.20%。随施氮量的增加,库尔勒香梨产量表现为先增大后减小,N₂PK 的库尔勒香梨产量最高,达到 6 213.5 kg · hm⁻²。

2.3 不同氮肥用量下库尔勒香梨园土壤铵态氮和硝态氮含量变化

由表 4 可知,在施用基肥和追肥后,在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中,施氮处理的铵态氮含量均显著高于不施氮处理,N₃PK 处理的铵态氮含量显著高于其他各处理,N₀P₀K₀和 N₀PK 处理、N₁PK 和 N₂PK 处理间的铵态氮含量无显著差异。在收获后,N₃PK 处理的铵态氮含量显著高于其他处理,N₀P₀K₀、N₀PK、N₁PK、N₂PK 处理间的铵态氮含量无显著差异。

表 3 不同氮肥用量下库尔勒香梨产量变化

Table 3 Yield variation of Korla fragrant pears under different N fertilizers		
处理 Treatment	施氮量/(kg · hm ⁻²) Nitrogen application rate	产量/(kg · hm ⁻²) Yield
N ₀ P ₀ K ₀	0	692.4±50.9c
N ₀ PK	0	876.3±30.2c
N ₁ PK	150	3326.8±50.6b
N ₂ PK	300	6213.5±132.1a
N ₃ PK	450	5861.8±84.6a

表 4 不同氮肥用量下土壤铵态氮和硝态氮含量变化/(mg · kg⁻¹)

Table 4 Changes of ammonium and nitrate N contents in soil under different N fertilizers							
土层深度 Soil depth	处理 Treatment	基肥后 After the base fertilizer		追肥后 After the top fertilizer		收获后 After harvest	
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
0~20 cm	N ₀ P ₀ K ₀	14.36±0.59c	17.83±1.19c	11.43±0.27c	11.13±0.29c	7.96±0.41b	7.76±0.56c
	N ₀ PK	14.75±0.82c	18.16±0.46c	11.71±0.46c	11.25±0.13c	8.02±0.84b	7.84±0.91c
	N ₁ PK	23.82±1.96b	24.38±1.72b	20.98±1.03b	21.46±0.83b	9.84±1.67ab	11.72±0.98b
	N ₂ PK	25.56±1.53b	26.71±0.81b	22.05±0.54b	22.92±1.25b	9.88±0.93ab	11.96±0.66b
	N ₃ PK	29.14±1.02a	30.28±1.29a	25.86±1.14a	26.18±0.70a	11.29±1.02a	14.68±0.82a
20~40 cm	N ₀ P ₀ K ₀	13.15±0.34c	16.02±0.44c	10.06±1.18c	10.66±0.92c	7.82±1.03b	7.59±0.52c
	N ₀ PK	13.59±0.61c	16.55±0.57c	10.08±1.35c	10.74±1.24c	7.86±1.29b	7.63±0.45c
	N ₁ PK	20.35±0.87b	22.79±1.32b	19.22±1.71b	19.77±1.28b	9.05±0.91ab	10.80±1.01b
	N ₂ PK	21.05±1.11b	24.25±0.76b	21.56±0.84b	21.24±1.40b	9.32±1.17ab	10.86±0.75b
	N ₃ PK	27.36±1.22a	28.01±0.88a	24.15±0.95a	24.73±1.10a	10.44±0.78a	14.35±1.31a

表 5 施氮量、土壤温度及含水量与氨挥发速率和氧化亚氮排放通量的相关性
Table 5 Correlation between N application rate, soil temperature and water content and ammonia volatilization rate and nitrous oxide emission flux

处理 Treatment	NH ₃			N ₂ O		
	温度/℃ Temperature	含水量/% Moisture content	施氮量/(kg·hm ⁻²) Nitrogen application rate	温度/℃ Temperature	含水量/% Moisture content	施氮量/(kg·hm ⁻²) Nitrogen application rate
N ₀ P ₀ K ₀	0.895 **	0.459 *		0.931 **	0.308	
N ₀ PK	0.902 **	0.431 *		0.951 **	0.248	
N ₁ PK	0.879 **	0.458 *	0.913 **	0.904 **	0.353	0.960 **
N ₂ PK	0.889 **	0.465 *		0.906 **	0.404	
N ₃ PK	0.910 **	0.379		0.898 **	0.392	

注: * 代表显著相关($P<0.05$), ** 代表极显著相关($P<0.01$)。
Note: * means significant correlation($P<0.05$), ** means highly significant correlation($P<0.01$).

3 讨 论

3.1 施氮量对库尔勒香梨园氨挥发速率和氧化亚氮排放通量的影响

在旱地土壤中,氨挥发主要是土壤溶液中的NH₄⁺通过水解扩散至大气的过程^[19-20]。氧化亚氮的排放主要是通过自养硝化和细菌异养反硝化作用产生并扩散至大气的过程,且由于旱地土壤长期处于好氧条件下,氧化亚氮的排放主要通过其硝化作用产生^[21-22]。影响氨挥发和氧化亚氮排放的主要是自然因素(土壤的 pH 值、温度、含水量和土壤中微生物的活性等)和人为因素(氮肥种类、施肥量、施肥方式和耕作制度等)^[19-23]。氨挥发和氧化亚氮排放与施用氮肥密切相关,本试验施氮处理的氨挥发与氧化亚氮排放均明显高于不施氮处理,说明施用氮肥为氨挥发与氧化亚氮排放提供了有效氮源,增加了氨挥发与氧化亚氮排放。万伟帆等^[24]研究发现,氨挥发量和氧化亚氮排放量在 1~4 d 内出现了峰值。本试验施氮处理的氨挥发速率和氧化亚氮排放通量均在施肥后第 4 天出现排放峰值和次峰值,表明施用氮肥尿素后,短时间(4 d)内能增加氨挥发速率和氧化亚氮排放通量,出现排放峰值和次峰值的原因主要是由于在 4 月 1 日和 6 月 1 日分别进行施基肥和施追肥,且基肥量(氮肥总量的 60%)大于追肥量(氮肥总量的 40%),氮肥施用量的降低,减少了氨挥发和氧化亚氮排放过程中可利用的有效氮源,使氨挥发速率与氧化亚氮排放通量减小,从而出现次峰值。本试验施氮处理的氨挥发速率和氧化亚氮排放通量均表现为 N₁PK<N₂PK<N₃PK,随着施氮量的增加,氨挥发速率和氧化亚氮排放通量逐渐增大,这与马银丽等^[13]研究结果一致。4 月 15 日和 6 月 15 日的施氮处理氨挥发速率和氧化亚氮排放通量并没有因为 4 月 10 日和 6 月 10 日的灌水而增大,这可能是由于 4 月 1 日和 6 月 1 日的施肥,使得 4 月 15 日和 6 月 15 日土壤内的氮

素含量与 5、7、8 月每月 15 日相比,盈余较多,氨挥发和氧化亚氮排放的肥料效应掩盖了其水分效应^[25],致使 4 月 15 日和 6 月 15 日的氨挥发速率和氧化亚氮排放通量低于其 4 月 5 日和 6 月 5 日。

3.2 施氮量对库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮累积量、净损失率及产量的影响

施氮量对库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放的累积有显著影响。邱炜红等^[26]研究发现,施氮量与土壤氧化亚氮排放总量有显著的指数函数关系,施氮能显著提高土壤氧化亚氮排放总量。本试验各处理氨挥发累积量达到 27.886~44.416 kg·hm⁻²·a⁻¹,氧化亚氮累积量达到 341.616~531.960 g·hm⁻²·a⁻¹,施氮处理的氨挥发和氧化亚氮累积量均显著大于不施氮处理,且均随着施氮量的增加而增加,与前人研究结果一致。同时氨挥发和氧化亚氮排放净损失量与氨挥发和氧化亚氮累积量的变化规律一致,会随着施氮水平的提高而增大,这与一些学者^[24,27]研究结果趋势相同。N₀P₀K₀、N₀PK、N₁PK、N₂PK 和 N₃PK 处理的氨挥发累积量分别是氧化亚氮排放累积量的 81.63、81.43、79.96、79.12 和 83.49 倍。N₁PK、N₂PK 和 N₃PK 处理的氨挥发净损失量分别是氧化亚氮排放净损失量的 74.36、72.06 和 87.36 倍,氨挥发累积量和净损失量均明显大于氧化亚氮排放累积量和净损失量。N₁PK、N₂PK 和 N₃PK 处理的氨挥发净损失量占肥料氮素气态(NH₃和 N₂O)损失量的 98.67%、98.63%和 98.87%,可见库尔勒香梨园土壤中的肥料氮素气态损失主要以氨挥发为主,与许多学者^[13,28]研究结果基本一致。

王珏等^[29]在冬小麦生长季中发现,施氮量在 75~300 kg·hm⁻²时,来自氮肥的氨挥发损失量为 0.72~7.61 kg·hm⁻²,占施氮总量的 1.0%~4.2%。本试验氨挥发净损失量为 6.726~16.197 kg·hm⁻²·a⁻¹,净损失率为 2.720%~4.480%,与前人相比测定结果偏高,主要原因是施肥量较高和测定周期较长。有研究发现菜地土壤氧化亚氮排放量占施氮

量的0.33%~1.13%^[26]。本试验氧化亚氮排放净损失率为0.038%~0.060%,低于前人研究结果,主要是由于香梨园较菜地翻耕和灌水次数少,菜地较多的翻耕有利于土壤矿化作用发生,产生更多的无机氮,且多次灌水会引发土壤频繁的干湿交替过程,这些因素均会促进氧化亚氮的排放,使氧化亚氮损失较多^[30]。本试验随着施氮量的增加,氨挥发和氧化亚氮净损失率呈现出先减小后增大的趋势,在施氮量为300 kg·hm⁻²时,氨挥发和氧化亚氮排放的净损失率均达到最小(2.720%和0.038%),这与许可等^[31]研究结果类似。氨挥发和氧化亚氮净损失率会随着施氮量的变化而变化,在施氮量较高的情况下,土壤中的氮素可能会在其它途径损失更多^[28],因此对今后库尔勒香梨园土壤氮素的气态损失,还需进一步研究。

林治安等^[32]对冬小麦-夏玉米连续22 a长期施肥定位试验的研究结果表明,作物产量达到一定水平后,继续高量施肥无助于作物产量提高。本试验在施氮量150~450 kg·hm⁻²范围内,库尔勒香梨产量先增加后降低。在施氮量为300 kg·hm⁻²时,产量达到最大(6 213.5 kg·hm⁻²),施氮量达到450 kg·hm⁻²时的库尔勒香梨产量与施氮量在300 kg·hm⁻²时相比降低了5.66%,这与山楠等^[33]发现氮肥施用过量作物产量反而降低的研究结果相同。

3.3 施氮量对库尔勒香梨园土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

施入土壤的氮肥在土壤微生物作用下转化形成无机氮,而无机氮在一定条件下通过氨挥发、硝化及反硝化等过程会以氨和氧化亚氮等气态形式从土壤中挥发损失^[8,34]。张燕等^[35]研究发现,0~20 cm、20~40 cm土层中,未施氮处理的铵态氮和硝态氮含量显著低于施氮处理。本试验在施基肥和施追肥后,0~20 cm和20~40 cm土层中施氮处理的铵态氮和硝态氮含量均显著大于不施氮处理,说明施用氮肥能显著增加0~20 cm和20~40 cm土层内的铵态氮和硝态氮含量,与前人研究结果一致。本研究0~20 cm和20~40 cm土层中,施氮处理铵态氮和硝态氮含量表现为N₁PK<N₂PK<N₃PK,铵态氮和硝态氮含量会随着施氮量的增加而增加,这与罗涛等^[36]和杨婷婷等^[37]研究结果相同。本试验,各处理20~40 cm土层中铵态氮和硝态氮含量均低于0~20 cm土层内的铵态氮和硝态氮含量,与徐福利等^[38]研究发现土壤铵态氮和硝态氮含量会随着土壤剖面不断降低结果相同。香梨园内施肥深度在30~40 cm,故0~40 cm土层内的铵态氮和硝态氮含量变化较能反映出氮素在土壤中转化为

气态形式的状况。本试验氨挥发速率和氧化亚氮排放通量与土壤中0~20 cm和20~40 cm土层内的铵态氮和硝态氮含量变化规律一致,均有从施基肥后至收获后逐渐减低的趋势,这与王珏等^[29]研究结果基本一致。

3.4 环境因子对库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放的影响

土壤氮素气态损失与土壤温度和土壤含水量密切相关。李银坤等^[39]研究结果表明,土壤温度与氨挥发速率呈正相关,温度的升高可促进氨挥发。徐文彬等^[40]研究发现,温度是影响土壤氧化亚氮日变化规律的主控因子,并与土壤氧化亚氮季节变化存在一定的正相关关系。本研究条件下,氨挥发速率和氧化亚氮排放通量均与土壤温度呈极显著正相关,这与前人研究结果一致。主要是因为适宜的溫度范围内,温度的升高不仅会使土壤胶体对NH₄⁺的吸附能力减弱,还会增强土壤微生物的活性,加快尿素水解为铵态氮,增加NH₄⁺在土壤溶液中的浓度,利于NH₄⁺转化为NH₃,使氨挥发速率加快^[41-42];此外温度升高能增强土壤硝化及反硝化微生物的活性,从而加快土壤硝化和反硝化反应速率,促进氧化亚氮排放,使氧化亚氮排放通量增大^[7,43]。

本试验各处理的氨挥发速率与土壤含水量呈显著正相关。各处理的氧化亚氮排放通量与土壤含水量呈正相关,但相关性不显著且相关系数较小,这与肖娇等^[44]和王立刚等^[45]研究结果类似。主要是因为梨园灌水后,土壤含水量增加,脲酶活性增强,使得尿素颗粒能与土壤充分接触,利于其转化成铵态氮,从而增加液相中铵态氮含量,促进了氨的挥发^[46];库尔勒香梨园属于旱地果园,土壤水分一般不会达到饱和状态,氧化亚氮主要由硝化作用产生,且主要来源于微生物参与下的硝化过程,所以使得土壤含水量对氧化亚氮排放影响较小。

4 结 论

1) 库尔勒香梨园土壤来自肥料氮素的气态损失主要以氨挥发为主。施用氮肥(尿素)能明显促进库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放。氨挥发速率、累积量以及净损失量和氧化亚氮排放通量、累积量以及净损失量均会随着尿素施用量的增加而增大。施用氮肥能显著增加0~20 cm和20~40 cm土层中铵态氮和硝态氮含量。

2) 库尔勒香梨园氨挥发和氧化亚氮排放与施氮量和土壤温度呈极显著正相关关系。

3) 在氮肥施用量为300 kg·hm⁻²(纯N)时,库

尔勒香梨产量最高(6 213.5 kg · hm⁻²),且氨挥发和氧化亚氮净损失率均最小(2.720%和 0.038%)。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017: 388.

[2] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933.

[3] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 213-249, 171-196.

[4] Halvorson A D, Del Grosso S J, Reule C A. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(4): 1337-1344.

[5] 王峰, 陈玉真, 吴志丹, 等. 酸性茶园土壤氨挥发及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 808-816.

[6] Tian C M, Cao J L, Cai Z C, et al. Ammonia volatilization from winter wheat field top dressed with urea [J]. Pedosphere, 1998, 8(4): 331-336.

[7] 张振贤, 华路, 尹逊霄, 等. 农田土壤 N₂O 的发生机制及其主要影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 114-120.

[8] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99-104.

[9] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 557-560.

[10] Ameloot N, Maenhout P, Neve S D, et al. Biochar-induced N₂O emission reductions after field incorporation in a loam soil [J]. Geoderma, 2016, 267: 10-16.

[11] 李勇先, 田光明. 不同水分管理模式下水稻土氮素形态转化与 N₂O 释放的关系[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 157-159.

[12] Mosier A, Kroeze C, Nevison C, et al. Closing the global N₂O budget: Nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52(2-3): 225-248.

[13] 马银丽, 吉艳芝, 李鑫, 等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氨挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 225-230.

[14] 王建, 诸葛玉平, 彭福田, 等. 袋控肥对土壤氨挥发、氧化亚氮和二氧化碳排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 294-297.

[15] 柴仲平, 王雪梅, 陈波浪, 等. 库尔勒香梨年生长期生物量及养分积累变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 656-663.

[16] 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.

[17] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氨挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 567-577.

[18] 胡保安, 贾宏涛, 朱新萍, 等. 不同水分条件下巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地夏季氧化亚氮日排放特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 811-817.

[19] 邓美华. 稻田生态系统优化施氮与氨挥发损失研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.

[20] 周丽平. 不同氮肥缓释化处理及施肥方式对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[21] 吕晓东, 王婷. 旱地农田氧化亚氮排放研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2018, (10): 67-73.

[22] 王颖. 长期施肥对旱地农田温室气体 N₂O 排放的影响[D]. 咸阳:

西北农林科技大学, 2017.

[23] 吴进. 不同氮肥品种对农田氨挥发及冬小麦产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.

[24] 万伟帆, 美丽, 红梅, 等. 内蒙古阴山北麓滴灌马铃薯田氨挥发和氧化亚氮排放特征[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 36-41.

[25] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913-918.

[26] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2238-2243.

[27] 刘红梅, 庞凤梅, 赖欣, 等. 供氮水平和有机无机配施对麦田土壤氨挥发的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, (12): 7119-7122.

[28] 吉艳芝, 巨晓棠, 刘新宇, 等. 不同施氮量对冬小麦田氮去向和气态损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 113-118.

[29] 王珏, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 华北平原小麦季氮肥氨挥发损失及影响因素研究[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(3): 5-11.

[30] 林杉, 冯明磊, 阮雷雷, 等. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1269-1276.

[31] 许可, 王春梅, 张艺, 等. 氮素化学形态及添加剂量对温带森林土壤 N₂O 排放的影响[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3): 74-80.

[32] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.

[33] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N₂O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163-170.

[34] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051-3058.

[35] 张燕, 王百群, 何瑞清. 不同施肥下冬小麦生长过程中土壤矿质氮变化及其与冬小麦叶片 SPAD 值的关系[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 78-82.

[36] 罗涛, 王焯平, 何盈, 等. 两种氮肥不同用量及添加双氰胺对蔬菜品质和土壤氮形态的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 383-388.

[37] 杨婷婷, 王庆惠, 陈波浪, 等. 不同施氮水平对库尔勒香梨园土壤无机氮分布的影响[J]. 经济林研究, 2017, (4): 80-89.

[38] 徐福利, 郭劲松, 王震, 等. 设施条件下氮肥对大青菜硝酸盐及土壤矿质氮累积的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 924-927.

[39] 李银坤, 梅旭荣, 武雪萍, 等. 不同水氮条件对日光温室冬春茬黄瓜栽培氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1413-1419.

[40] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 1-8.

[41] 杨弘. 秸秆还田对农田棕壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.

[42] Xu J G, Heeraman D A, Wang Y. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil [J]. Biology & Fertility of Soils, 1993, 16(1): 63-65.

[43] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 457-466.

[44] 肖娇, 樊建凌, 桂叶萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 2011-2018.

[45] 王立刚, 李虎, 邱建军. 黄淮海平原典型农田土壤 N₂O 的排放特征[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1248-1254.

[46] 杨晓云, 杨虎德. 不同施肥条件下北方夏玉米农田土壤氨挥发研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, (11): 137-142.