

有机无机肥配施对宁夏引黄灌区露地菜田 土壤氨挥发的影响

罗健航¹, 赵 莹¹, 任发春², 陈晓群¹, 刘宏斌³, 张学军¹

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002;

2. 宁夏永宁县杨和镇农业技术服务中心, 宁夏 永宁 750199;

3. 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了探讨宁夏引黄灌区露地菜田土壤氨挥发损失特征, 于2013年5—9月在该区域露地花椰菜—大白菜轮作体系下, 采用田间小区试验, 研究了不同有机无机肥配施对土壤氨挥发速率、氨挥发损失通量及其损失率的影响。结果表明: 露地花椰菜和大白菜基肥后, 不同有机无机肥配施处理下土壤氨挥发损失高峰通常出现在第1~4天, 而追肥后提前到1~2天, 在高量施氮处理下, 氨挥发延续时间在10天以上; 花椰菜季大多数施肥处理的氨挥发损失发生在追肥阶段(占总氨挥发损失通量的50.2%~60.3%, 单施有机肥和低氮处理除外), 大白菜季各处理的氨挥发损失主要在基肥阶段(占总氨挥发损失通量的57.0%~73.6%); 露地花椰菜基肥和追肥后, 不同施肥处理下土壤氨挥发最大速率分别在0.79~4.56、1.00~5.34 kg·hm⁻²·d⁻¹之间, 而露地大白菜季分别为3.49~13.09、1.54~7.03 kg·hm⁻²·d⁻¹; 不同有机无机肥配施下, 花椰菜和大白菜全生育期内土壤氨挥发损失通量分别为5.15~35.82、11.11~70.60 kg·hm⁻², 其随总施氮量的增加而增加; 花椰菜和大白菜季不同施肥处理的土壤氨挥发损失率分别为4.02%~4.87%和2.54%~10.55%, 其化肥贡献率分别为62.0%~100.0%和85.5%~100.0%, 且化肥贡献率随化学氮肥用量的增加而增加。因此, 在同等施用有机肥的情况下, 合理降低化肥氮用量是减少该地区露地菜田土壤氨挥发损失的重要措施。

关键词: 露地菜田; 花椰菜—大白菜轮作; 有机无机肥配施; 土壤氨挥发; 宁夏引黄灌区

中图分类号: S143.1; X51 **文献标志码:** A

Effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization in open vegetable field of the Yellow River Irrigation Region in Ningxia

LUO Jian-hang¹, ZHAO Ying¹, REN Fa-chun², CHEN Xiao-qun¹, LIU Hong-bin³, ZHANG Xue-jun¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

2. Ningxia Yongning Agricultural Technology Extension Service Yanghe Twon Center, Yongning, Ningxia 750199, China;

3. Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the emission loss characteristics of soil ammonia volatilization in the Yellow River Irrigation Region of Ningxia, a field experiment was conducted under the rotation system of open field broccoli and Chinese cabbage from May to September, 2013 to have studied the effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on rate of soil ammonia volatilization, accumulative loss by ammonia volatilization, and loss ratio of N applied. The results indicated that the peak rates of ammonia volatilization after base fertilization in open field broccoli and Chinese cabbage appeared generally within 1~4 days, whereas the peak rates anticipated 1~2 days after top dressing. Soil ammonia volatilization could sustain more than 10 days with high N application rates. Soil ammonia volatilization happened mostly during top dressing fertilizers treatments in broccoli season (accounted for the total ammonia volatiliza-

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 公益性行业(农业)科研项目(201003014); 国家自然科学基金项目(41361062)

作者简介: 罗健航(1968—), 女, 四川达县人, 大学本科, 农艺师, 主要从事农田施肥与环境研究。E-mail: ljhang-2006@163.com。

通信作者: 张学军(1965—), 男, 宁夏银川人, 博士, 研究员, 主要从事土壤-植物系统中的氮素行为研究。E-mail: zhxjun2002@163.com。

tion by 50.2% ~ 60.3%, except for treatments with only manure and low N rate application). However, ammonia primarily became lost during base fertilization in Chinese cabbage season (accounted for the total ammonia volatilization by 57.0% ~ 73.6%). The maximal rates of ammonia volatilization after base and top dressing fertilizations in open field broccoli ranged from 0.79 ~ 4.56 and 1.00 ~ 5.34 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, and the corresponding maximal rates in Chinese cabbage ranged from 3.49 ~ 13.09 and 1.54 ~ 7.03 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. In different combined applications of organic - inorganic fertilizer treatments, accumulative losses by ammonia volatilization during the total growing periods of broccoli and Chinese cabbage ranged from 5.15 ~ 35.82 and 11.11 ~ 70.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, which were always elevated with the increase of total N application. The loss ratios of N applied in different fertilization treatments ranged from 4.02% ~ 4.87% and 2.54% ~ 10.55% in broccoli and Chinese cabbage seasons, respectively, and the corresponding contribution ratios of chemical fertilizers were 62.0% ~ 100.0% and 85.5% ~ 100.0%, respectively. The contribution ratios of chemical fertilizers were upraised with the increase of chemical N application. Therefore, with the application of organic manure at the same level, it is important to decrease chemical N application, reducing emission loss by soil ammonia volatilization in the open vegetables field in this region.

Keywords: open vegetables field; broccoli and Chinese cabbage rotation; combined application of organic-inorganic fertilizers; soil ammonia volatilization; the Yellow River Irrigation Region of Ningxia

氮肥是作物增产的重要保障,相对于谷类作物,蔬菜种植通常需要更高强度的管理和大量水肥投入^[1-2]。施用氮肥造成的氨挥发是全球氨排放的重要来源^[3]。过去 10 多年里,中国氮肥用量超过了全球氮肥用量的 30%^[4]。据统计,全球氨排放总量中 20% 来自中国^[5],特别是来自集约化程度高的农业地区。我国禾谷类作物的氮肥利用率仅 28% ~ 41%,大部分氮素通过土壤淋洗、氨挥发和反硝化等途径损失掉^[6]。施氮量、肥料配施和施用方法等因素都影响土壤氨挥发^[7-10]。氮素过量施用易使氨挥发加剧,研究表明,农田氨挥发损失的氮素占总施氮量的 1% ~ 47%^[6,11],露地蔬菜地氨挥发率在 12.1% ~ 24.0% 之间,控释尿素氨挥发率仅为 0.97%^[10,12]。

据统计,2009 年,宁夏全区蔬菜种植面积达 12.4 万 hm^2 ,其中,露地蔬菜种植面积比例达 54.6%,引黄灌区蔬菜种植面积占全区的 55.5%^[13]。据张学军等^[14]调查结果,宁夏灌区大棚蔬菜平均投入的化肥 N 540 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 257 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 102 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可见宁夏灌区蔬菜种植中氮肥过量十分严重。因此,研究宁夏引黄灌区露地蔬菜栽培下氮

肥的合理施用及其环境效应具有重要意义,而有机无机肥配施下露地菜田土壤氨挥发的研究尚未涉及。本文通过田间小区试验,在宁夏引黄灌区露地花椰菜 - 大白菜轮作体系下研究了不同有机无机肥配施对土壤氨挥发速率、氨挥发损失通量及其损失率的影响,为该区域露地蔬菜有机无机肥的合理配施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年 5—10 月在宁夏引黄灌区银川市兴庆区掌政镇杨家寨村 5 队进行,该地的地理坐标为 E106°21'01.28",N38°26'43.74",海拔 1 069 m。试验地属于半干旱平原区,主要气候特点是干旱少雨,年降雨量不足 300 mm,降水年内分配不均,7—9 月三个月的降雨量占全年降雨量的 60% ~ 70%。年均蒸发量 1 100 ~ 1 600 mm,年均气温 8℃ ~ 9℃,作物生长季节 4—9 月 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为 3 200℃ ~ 3 400℃。试验地土壤类型为灌淤土,0 ~ 20 cm 土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Soil basic chemical and physical characteristics in the experiment field

土层 Soil depth /cm	pH	有机质 O. M. /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0 ~ 20	8.25	9.88	0.75	1.10	13.4	16.14	20.30

1.2 试验设计

露地花椰菜 - 大白菜轮作种植方式,试验设 8

个施氮处理:① N0(不施氮肥和有机肥;磷钾肥优化用量);② MN0(施用有机肥不施氮肥,每季蔬菜

施用折合干鸡粪 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷钾肥施用同 N0 处理); ③ MN0.75(有机肥 + 75% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理); ④ MN1(有机肥 + 100% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理); ⑤ MN1.25(有机肥 + 125% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理); ⑥ MN1.5(有机肥 + 150% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理); ⑦ MN2(有机肥 + 200% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理); ⑧ N1(100% 的优化施氮量, 磷钾肥施用同 N0 处理)。试验重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积为 30 m^2 ($12 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$)。

参考张宏彦、张学军等研究结果^[15-16], 第一季花椰菜的 N、 P_2O_5 、 K_2O 优化施肥量分别为 300、105、250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第二季大白菜的 N、 P_2O_5 、 K_2O 优化施肥量分别为 225、90、225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮肥为 N 46% 普通尿素, 磷肥为 P_2O_5 46% 重过磷酸钙, 钾肥为 K_2O 50% 硫酸钾。纯鸡粪作为有机肥, 用量按烘干基 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (全氮、磷、钾分别为 N 19.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、P 21.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、K 10.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。两季蔬菜的磷钾肥和有机肥全部基施, 氮肥基施 50%, 追施 50% (分别在花椰菜和大白菜的莲座期进行 1 次追肥)。

露地蔬菜采用畦上覆膜栽培, 畦面宽 130 cm, 高 30 cm, 畦间距 50 cm。花椰菜品种为春秀, 2013 年 5 月 6 日穴播方式移栽, 栽培密度为每公顷 3.5 万株 (株 \times 行距 50 cm \times 55 cm), 当年 7 月 4 日收获; 大白菜品种为小义和秋, 2013 年 7 月 24 日畦上条播, 8 月 20 日定植, 栽培密度为每公顷 5.6 万株 (株 \times 行距 35 cm \times 60 cm), 当年 10 月 8 日收获。试验地栽培管理和病虫害防治同当地大田。蔬菜灌溉方式都是引黄河水沟灌, 第一季花椰菜灌水 5 次, 每次灌水量 25.9 ~ 56.4 mm; 第二季大白菜灌水 4 次, 每次灌水量 33.4 ~ 68.5 mm。

1.3 样品采集与测定方法

氮挥发采用密闭室间歇通气法测定^[6], 密闭室为内径 20 cm、高 15 cm 的无底有机玻璃圆筒, 将其嵌入土中约 2 cm。密闭室顶部留有直径 25 mm 的进气孔, 与高 2.5 m 的通气管相连, 出气口与氨吸收装置相连, 通过真空泵控制阀保持交换室内空气交换频率为 15 次 $\cdot \text{min}^{-1}$ 左右。氨吸收装置中吸收溶液为 60 ml 浓度为 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀硫酸溶液。测定时间为每日上午 9:00—10:00 和下午 15:00—16:00, 这段时间土壤产生的气态氮相当于全天的平均水平, 以该 2 小时平均通量折算一天的氮挥发通量。露地蔬菜施肥 (基肥或追肥) 灌水后第二天起开始抽气测定, 如果遇阴天或下雨天, 可隔 12 天测一

次, 直到施肥后 10 ~ 11 天停止, 此时施氮处理与对照的氮挥发通量基本无差异。抽气结束后将吸收液带回实验室, 然后在实验室内利用靛酚蓝比色法测定吸收液中铵态氮的含量。

1.4 计算公式与数据统计分析

$$F = D \times 10^{-6} \times V_a \times 10^{-3} \times 10^4 / (\pi \times r^2) \times V_c / V_s \times 24 / t$$

式中, F 为氮挥发通量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); D 为铵态氮的测定值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_a 为酸阱中稀硫酸溶液的体积 (ml); r 为气室的半径 (m); V_c 为比色管容积 (ml); V_s 为比色法测定时的取样量 (ml); t 为氮挥发收集时间 (h)。

施肥处理氮挥发累积损失率 (%) = (施肥处理氮挥发量 - 不施氮 N0 处理氮挥发量) / 施氮量 \times 100

氮挥发累积量中化肥的贡献率 (%) = (施肥处理氮挥发量 - 单施有机肥处理氮挥发量) / (施肥处理氮挥发量 - 不施氮 N0 处理氮挥发量) \times 100

采用 Excel 2007 和 DPS 7.05 进行图表处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 有机无机肥配施对露地花椰菜 - 大白菜轮作体系土壤氮挥发速率的影响

从图 1 可以看出, 露地花椰菜基肥后, 不同有机无机肥配施处理下土壤氮挥发速率高峰通常出现在第 1 ~ 3 天, 即使在单施有机肥的 MN0 处理下, 氮挥发速率峰值也达 2.39 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 6 天之后, 各施肥处理的氮挥发速率都降低到 0.60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下, 并不断降低至基肥后 10 天, 增施肥处理氮挥发速率与对照 (N0) 接近。在高氮 MN1.5 和 MN2 处理下, 其基肥后氮挥发速率一直保持较高水平, 分别在 1.74 ~ 2.60、1.15 ~ 3.75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 直至基肥后 6 天二者相比才无明显差异。花椰菜追肥后 1 天内, 不同施肥处理下土壤氮挥发速率都达到最高峰, 除高氮 MN1.5 和 MN2 处理的氮挥发速率随施肥后天数而不断降低外 (第 7、8 天有降雨, 未测定), 其它各个施肥处理在追肥后第 6 天达第二个峰值, 氮挥发速率在 0.73 ~ 1.22 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间, 至第 11 天不同施肥处理达到接近水平。在高氮 MN1.5 和 MN2 处理下, 其追肥后氮挥发速率一直高于其它有机无机配施处理, 直至第 6 天, 分别在 1.90 ~ 5.08、2.04 ~ 5.34 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。值得注意的是, 各个施肥处理基追肥后氮挥发速率的峰值并不随施氮量增加而增加, 可能还受到土壤温度等其它因素影响。

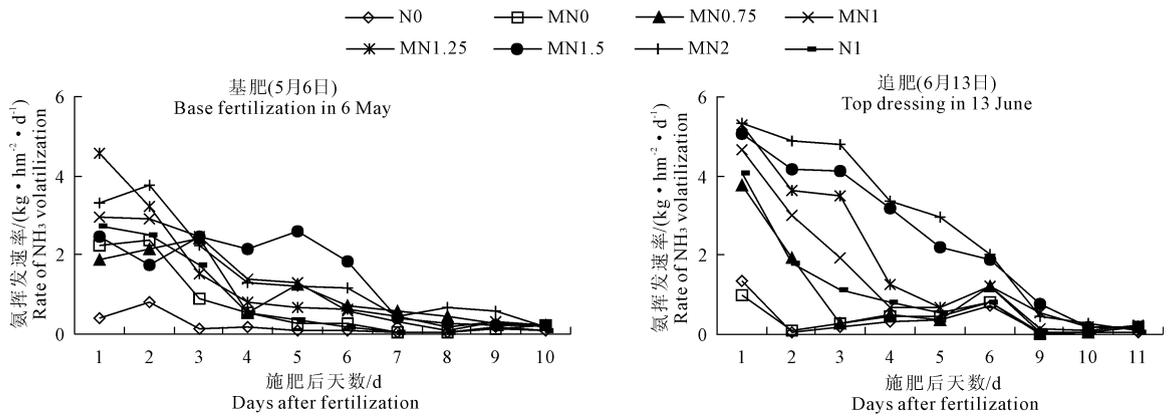


图 1 不同有机无机肥配施下花椰菜生育期内土壤氨挥发速率

Fig.1 Rates of soil NH_3 volatilization during the broccoli growing periods with different combined N application of organic-inorganic fertilizers

图 2 显示,露地大白菜基施肥后,不同有机无机肥配施处理下土壤氨挥发速率高峰出现在第 1 天和第 4 天(第 3 天有降雨,未测定),之后都不断降低,但 MN2 处理的氨挥发速率都高于其它施肥处理,至施肥后第 10 天,依然高达 $1.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其它施肥处理间达到接近水平。在中低氮处理下,土壤氨挥发损失主要在基施肥后 6 天内,而在高氮

MN1.5 和 MN2 处理下,氨挥发损失持续时间较长,甚至超过 10 d。露地大白菜追肥后,各施肥处理下土壤氨挥发高峰在第 1~2 天内,之后不断降低,至第 10 天达到 $0.02 \sim 0.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。除 MN2 处理外,追肥后 5 d 内,其它施肥处理的土壤氨挥发损失迅速降低到较低水平。

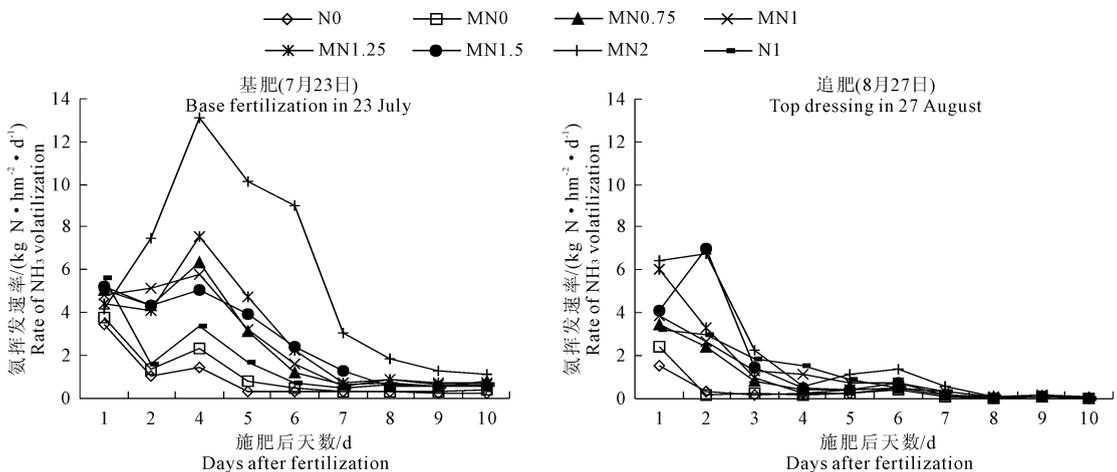


图 2 不同有机无机肥配施下大白菜生育期内土壤氨挥发速率

Fig.2 Rates of soil NH_3 volatilization during the Chinese cabbage growing periods with different combined N application of organic-inorganic fertilizers

以上分析结果表明,露地花椰菜或大白菜基施肥后的土壤氨挥发损失高峰主要出现在第 1~4 天,而追肥后提前到第 1~2 天内。

2.2 有机无机肥配施对露地花椰菜-大白菜轮作体系土壤氨挥发损失量的影响

2.2.1 露地花椰菜-大白菜轮作体系基追肥对土壤氨挥发的影响

露地花椰菜-大白菜轮作体系基追肥对土壤氨挥发最大速率和阶段累积量如表 2 所示,结果表明,露地花椰菜基肥和追肥后,不同施肥

处理下土壤氨挥发最大速率分别在 $0.79 \sim 4.56$ 、 $1.00 \sim 5.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,分别以 MN1.25 和 MN2 处理下最高,以 N0 和 MN0 最低。可能由于花椰菜基肥时气温和土壤温度较低,此时各施肥处理氨挥发的阶段累积量为 $2.05 \sim 14.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处理间差异均不显著;而花椰菜追肥后,只有 MN2 处理的氨挥发累积量 ($20.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 显著高于 N0 和 MN0 处理(分别为 3.10 、 $3.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其它有机无机配合的增施氮肥处理间都无显著差异。不同有机

无机肥配施下,花椰菜基肥后土壤氮挥发累积量占整个蔬菜生长期总累积量的比例为 39.7% ~ 68.6%,追肥后占比例为 31.4% ~ 60.3%,除 MN0 和 MN0.75 处理外,花椰菜季大多数施肥处理的氮挥发损失比例在追肥阶段。

表 2 还可看出,露地大白菜基肥和追肥后,不同施肥处理下土壤氮挥发最大速率分别在 3.49 ~ 13.09、1.54 ~ 7.03 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,通常以 MN2 和 MN1.5 处理下最高,N0 处理最低。各施肥处理下大白菜基肥阶段氮挥发累积损失量达 7.82 ~ 51.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其占整个蔬菜生长期总累积量的

57.0% ~ 73.6%,是大白菜季氮挥发的主要损失阶段;相对于 MN0 处理,仅 MN1.25 和 MN2 氮挥发量显著增加。不同施肥处理下大白菜追肥期间氮挥发累积损失量为 3.29 ~ 19.35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其占整个蔬菜生长期总累积量的 26.4% ~ 43.0%,相对于 N0 和 MN0 处理,增施氮肥处理的氮挥发累积损失量都明显提高。在 MN2 处理下,大白菜基肥或追肥的阶段氮挥发累积损失量都显著高于其它施肥处理(MN1.5 除外),说明在极其过量的高氮处理下,氮挥发损失显著增加。

表 2 不同有机无机肥配施下基追肥对土壤氮挥发最大速率和累积量的影响

Table 2 Effects of base and top dressing fertilization on the maximal rates and accumulative amounts of soil NH_3 volatilization with different combined N application of organic-inorganic fertilizers

处理 Treatments	花椰菜 Broccoli				大白菜 Chinese cabbage			
	基肥 Base fertilization		追肥 Top dressing		基肥 Base fertilization		追肥 Top dressing	
	最大速率 Max. rate $\text{/(kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	累积量 Accum. $\text{/(kg}\cdot\text{hm}^{-2})$						
N0	0.79	2.05 a	1.36	3.10 b	3.49	7.82 d	1.54	3.29 c
MN0	2.39	7.09 a	1.00	3.24 b	3.81	10.18 cd	2.39	3.82 c
MN0.75	2.42	10.49 a	3.76	8.29 ab	6.36	22.85 bc	3.49	8.20 bc
MN1	2.98	12.52 a	4.67	12.63 ab	5.79	23.38 bc	3.86	11.04 b
MN1.25	4.56	12.53 a	5.28	16.45 ab	7.55	26.19 b	6.00	11.73 b
MN1.5	2.60	14.39 a	5.08	17.34 ab	5.20	23.93 bc	7.03	14.56 ab
MN2	3.75	14.84 a	5.34	20.98 a	13.09	51.25 a	6.72	19.35 a
N1	2.74	8.43 a	4.09	9.32 ab	5.60	15.29 bcd	3.24	11.56 b

注:同列数值后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同。

Note: Values followed by different small letters within a column are significant at 5% level, and hereinafter.

2.2.2 露地花椰菜-大白菜生育期间氮挥发损失量及比例 表 3 结果表明,不同有机无机肥配施下花椰菜-大白菜全生育期内土壤氮挥发累积损失量分别为 5.15 ~ 35.82、11.11 ~ 70.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其随施氮量的增加而增加,尽管大白菜季同一处理的施氮水平低于花椰菜季,但其土壤氮挥发累积损失量却相对较高。花椰菜季,相对于 MN0 处理,只有 MN1.5 和 MN2 处理的土壤氮挥发累积损失量增加达显著水平,而单施化肥 N1 与 N0 处理间差异不显著。在大白菜季,相对于 N0 和 MN0 处理,其它增施氮肥处理能显著地提高土壤氮挥发累积损失量,而且高氮 MN2 处理也显著高于其它有机无机配施处理,表明在大白菜季,合理控制施氮量能显著降低土壤氮挥发累积损失量。不同有机无机肥配施下,花椰菜季土壤氮挥发损失率为 4.02% ~ 4.87%,对土壤氮挥发的化肥贡献率为 62.0% ~ 100.0%;大白菜季的损失率为 2.54% ~ 10.55%,化肥贡献率为

85.5% ~ 100.0%。在施用有机肥的处理下,其土壤氮挥发化肥贡献率随化学氮肥用量的增加而增加,而且大白菜季的化肥贡献率明显较高。相对于 N1 处理,花椰菜或大白菜季 MN1 处理下的土壤氮挥发累积损失量反而增加,但都未达到显著水平,这说明即使单施有机肥造成的土壤氮挥发依然不可忽视(花椰菜或大白菜季分别达 10.33、14.00 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

3 结论与讨论

贺发云等^[11]在对南京地区露地菜田土壤氮挥发的研究中发现,追肥氮挥发速率的峰值出现在第 1 天或第 2 天,氮挥发延续时间在 12 ~ 18 d。郝小雨等^[9]在天津郊区利用设施芹菜-番茄轮作田间试验,采用通气法监测土壤氮挥发结果表明,施基肥后 2 ~ 3 d 出现土壤氮挥发峰值,8 ~ 10 d 接近对照水平;追肥第 1 天出现氮挥发峰值,第 10 ~ 11 天接近对照水平。本试验条件下,露地花椰菜和大白菜基

肥后,不同有机无机肥配施处理下土壤氨挥发速率高峰通常出现在第 1~4 天,而追肥后提前到 1~2 天,在高量施氮水平 MN1.5 和 MN2 处理下,氨挥发延续时间可达 10 d 以上,这与以上研究结果基本类似。但也有研究发现^[17],设施菜田土壤在氮肥基施后第 7 天才出现氨挥发速率峰值,至基肥后第 21 天接近不施氮处理;追施后施肥带与非施肥带的氨挥发速率峰值分别在第 1 天与第 5 天出现,分别于追肥后第 7 天和第 10 天接近不施氮处理。贺发云等^[11]研究还发现,露地小青菜基肥后氨挥发量占全生育期总量的 66.8%~74.5%,而露地大白菜氨挥发损失主要发生在追肥阶段。但设施菜田土壤氨挥

发损失的主要时期在基肥和前两次追肥阶段,氨挥发量占当季损失量的 70%~80%。本研究中,花椰菜基肥后土壤氨挥发累积量占整个蔬菜生长期总累积量的比例为 39.7%~68.6%,追肥后占比例为 31.4%~60.3%,除 MN0 和 MN0.75 处理外,花椰菜季大多数施肥处理的氨挥发损失发生在追肥阶段;各有机无机施肥处理下大白菜基肥阶段氨挥发累积损失量占整个蔬菜生长期总累积量的 57.0%~73.6%,是大白菜季氨挥发的主要损失阶段。氨挥发损失的关键时期更多的与土壤条件(pH 值、有机质、铵态氮含量等)、气温、地温等因素有关,而与施肥量关系不大^[9-10,17-19]。

表 3 不同有机无机肥配施下花椰菜-大白菜全生育期内土壤氨挥发累积损失量

Table 3 Accumulative losses of soil NH₃ volatilization during the broccoli-Chinese cabbage growing periods with different combined N applications of organic-inorganic fertilizers

处理 Treatments	花椰菜 Broccoli				大白菜 Chinese cabbage			
	施氮量 * N rates /(kg·hm ⁻²)	氨挥发累积量 Accumulative loss by NH ₃ volatilization /(kg·hm ⁻²)	损失率 Loss ratio of N applied /%	化肥贡献率 Contrib. ratio of chem. fert /%	施氮量 * N rates /(kg·hm ⁻²)	氨挥发累积量 Accumulative loss by NH ₃ volatilization /(kg·hm ⁻²)	损失率 Loss ratio of N applied /%	化肥贡献率 Contrib. ratio of chem. fert /%
N0	0	5.15 c	—	—	0	11.11 d	—	—
MN0	114	10.33 bc	4.54	—	114	14.00 cd	2.54	—
MN0.75	339	18.78 abc	4.02	62.0	283	31.05 b	7.05	85.5
MN1	414	25.15 abc	4.83	74.1	339	34.42 b	6.88	87.6
MN1.25	489	28.98 ab	4.87	78.3	395	37.92 b	6.78	89.2
MN1.5	564	31.73 a	4.71	80.5	452	38.49 b	6.06	89.4
MN2	714	35.82 a	4.29	83.1	564	70.60 a	10.55	95.1
N1	300	17.75 abc	4.20	100.0	225	26.85 bc	6.99	100.0

注: * 施氮量包括有机肥输入氮。

Note: total N application including manure N input.

氮肥施用可显著促进土壤氨挥发,并随施肥量增加而增加^[20]。本研究亦显示,不同有机无机肥配施下花椰菜和大白菜全生育期内土壤氨挥发累积损失通量分别为 5.15~35.82、11.11~70.60 kg·hm⁻²,其随施氮量的增加也增加,但除了 MN2 处理外,在有机无机配施处理 MN0.75、MN1、MN1.25 和 MN1.5 之间,两季露地蔬菜的土壤氨挥发损失通量均无显著差异,这可能是有机无机肥配施有利于控制土壤氮素转化,延缓了施入肥料氮氨挥发。已有研究证明,有机肥能增加土壤的持水量,降低了液相中氨浓度,从而降低了土壤氨挥发速率^[21]。此外,有机肥配施氮肥能够促进土壤微生物活动,将土壤无机氮固定在有机氮库中,减少了产生氨的无机氮量,进而降低氨挥发损失^[22]。同等施肥处理下,大白菜季氨挥发损失通量明显高于花椰菜季,这可能与大白菜生育期内较高的气温和土温有关。在设施蔬菜栽培

条件下,有机无机肥料配合施用土壤氨挥发损失率为 1.2%~2.2%^[9],而在不同水氮供应下肥料氨挥发损失率为 0.97%~1.27%^[17]。而在露地菜田,土壤氨挥发损失率有所增加。龚巍巍等^[12]用模拟试验方法对菜地(蔬菜上海青和生菜)施用尿素氨挥发特征进行研究,表明上海青撒施基肥和撒施追肥的氨挥发损失达 23.6%和 21.3%,生菜穴施基肥和撒施追肥的氨挥发损失率达 17.6%和 24.0%,氨挥发损失率与施氮量呈负相关。在南京地区 pH 值为 7.7 的露地大白菜试验田,低氮和高氮处理(施氮量分别为 N 300 kg·hm⁻²和 600 kg·hm⁻²)氨挥发损失率分别为 12.1%和 17.1%^[10]。本研究露地花椰菜和大白菜种植下,各有机无机肥配施处理在花椰菜季的土壤氨挥发损失率为 4.02%~4.87%,对土壤氨挥发的化肥贡献率为 62.0%~100.0%;大白菜季的损失率为 2.54%~10.55%,化肥贡献率为 85.5%

~100.0%。在施用有机肥的处理中,其土壤氮挥发化肥贡献率随化学氮肥用量的增加而增加,可见合理地控制化肥氮用量是降低土壤氮挥发损失的重要措施。土壤氮挥发损失受到多种因素影响,施氮量只是其中一个重要因素,而在宁夏引黄灌区露地菜田土壤条件(pH值、有机质、铵态氮含量等)、气温、土温、灌水等其它因素对氮挥发速率、氮挥发损失通量及损失率的影响研究依然需要深入探讨。

参考文献:

- [1] Chen Qing, Zhang Xiao-sheng, Zhang Hong-yan, et al. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosyst*, 2004, 69:51-58.
- [2] Thompson R B, Martinez-Gaitan C, Gallardo M, et al. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89: 261-274.
- [3] Harrison R, Webb J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 73:65-108.
- [4] Zhang Y, Dore A J, Ma L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2):490-501.
- [5] Klimont Z. Current and Future Emissions of Ammonia in China[C]// The 4th Workshop on the Transport of Air Pollutants in Asia. Luxembourg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2001.
- [6] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社, 1992:171-194.
- [7] Davidson E. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2:659-662.
- [8] 葛顺峰,姜远茂,彭福田,等.春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氮挥发的影响[J].*水土保持学报*, 2010, 24(5):199-203.
- [9] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对日光温室土壤氮挥发的影响[J].*中国农业科学*, 2012, 45(21):4403-4414.
- [10] 贺发云,尹斌,金雪霞,等.南京两种菜地土壤氮挥发的研究[J].*土壤学报*, 2005, 42(2):253-259.
- [11] Tian Guangming, Gao Jinliu, Cai Zucong, et al. Ammonia volatilization from winter wheat field topdressed with urea[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(4):331-3361.
- [12] 龚巍巍,张宜升,何凌燕,等.菜地氮挥发损失及影响因素原位研究[J].*环境科学*, 2011, 32(2):345-350.
- [13] 宁夏统计局.宁夏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2010.
- [14] 张学军,陈晓群,王黎民,等.宁夏大棚蔬菜生产现状及施肥中存在的问题和对策[J].*宁夏农林科技*, 2004, 2:44-47.
- [15] 张宏彦,陈清,李晓林,等.控制淋洗条件下土壤-花椰菜体系无机氮动态及平衡[J].*土壤通报*, 2004, 35(2):130-135.
- [16] 张学军,陈晓群,罗健航,等.不同水氮措施对芹菜-白菜轮作体系中氮素利用与土壤NO₃⁻-N残留的影响[J].*土壤通报*, 2007, 38(5):906-910.
- [17] 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氮挥发的影响[J].*中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1413-1419.
- [18] 田光明,蔡祖聪,曹金留,等.镇江丘陵区稻田化肥氮的氮挥发及其影响因素[J].*土壤学报*, 2001, 38(3):324-332.
- [19] 纪锐琳,朱义年,佟小薇,等.竹炭包膜尿素在土壤中的氮挥发损失及其影响因素[J].*桂林工学院学报*, 2008, 28(1):113-118.
- [20] Ma B L, Wu T Y, Tremblay N, et al. On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102:134-144.
- [21] 李宗新,王庆成,刘开昌,等.不同施肥模式下夏玉米田间土壤氮挥发规律[J].*生态学报*, 2009, 29(1):307-314.
- [22] 董文旭,吴电明,胡春胜,等.华北山前平原农田氮挥发速率与调控研究[J].*中国生态农业学报*, 2011, 19(5):1115-1121.

(上接第68页)

- [6] 王建林.燕麦叶片光合速率、气孔导度对光强和CO₂的响应与模拟[J].*华北农学报*, 2009, 24(3):134-137.
- [7] 陈雄,吴冬秀,王根轩,等.CO₂浓度升高对干旱胁迫下小麦光合作用和抗氧化酶活性的影响[J].*应用生态学报*, 2000, 11(6):81-84.
- [8] 练宏斌,黄高宝,谢军红,等.不同耕作措施对旱地春小麦旗叶光合特性的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 2009, 44(1):64-68.
- [9] 张凤云,张恩和.保护性耕作对黑河流域农田土壤水分利用的影响[J].*自然资源学报*, 2013, 28(2):234-243.
- [10] 雷金银,吴发启,王健,等.保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J].*农业工程学报*, 2008, 24(10):40-44.
- [11] 陈蓓,张仁陟.免耕与覆盖对土壤微生物数量及组成的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 2004, 39(6):634-638.
- [12] Claudia P J, Sisti Rainoldo Kohmann, Bruno J R. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76:39-58.
- [13] Shipitalo M J, Dick W A, Edwards W M. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 53:167-183.
- [14] 杨江山,张恩和,黄高宝,等.保护性耕作对菘蓝光合特性和保护酶活性的影响[J].*草业学报*, 2010, 19(1):113-120.
- [15] 房清龙,林琪,刘义国,等.保护性耕作方式对冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响[J].*农学学报*, 2012, 2(12):6-11.
- [16] 陈宝峰,许继光,韩战省.山西省保护性耕作技术推广模式研究[M].北京:中国农业出版社, 2010:1-28.
- [17] 王晶晶,李铭,高疆生,等.不同栽植模式对骏枣叶片光合特征的季节性影响[J].*塔里木大学学报*, 2012, 24(3):31-35.
- [18] 吴婕,朱钟麟,郑家国,等.秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J].*西南农业学报*, 2006, 19(2):192-195.
- [19] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].*农业工程学报*, 2012, 24(4):99-102.