

华北平原中部夏玉米农田不同施氮水平氨挥发规律

山楠¹, 赵同科³, 杜连凤³, 安志装³, 何艳洁¹, 郝玉翠¹, 孙秀君¹, 串丽敏^{2*}

(1. 唐山学院环境与化学工程系, 河北 唐山 063000; 2. 北京市农林科学院农业信息与经济研究所, 北京 100097; 3. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097)

摘要:以华北平原中部地区潮土为对象, 研究了撒施不同水平尿素对夏玉米季氨挥发的影响, 为合理施用氮肥和减少农田氨挥发损失提供依据。结合当地农民种植与施氮习惯, 试验设置 8 个施氮水平, 分别为 0 (N0)、50 (N1)、100 (N2)、150 (N3)、200 (N4)、250 (N5)、300 (N6)、400 (N7) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 利用田间试验原位测定-密闭室连续抽气法测定氨挥发。结果表明, 夏玉米种植体系在施入氮肥后发生了明显的氨挥发, 且氨挥发主要发生在施肥后 5 d 内, 在施肥后 1 ~ 3 d 出现氨挥发速率峰值, 基肥与追肥后氨挥发通量最大分别达到 N 2.35、5.30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 基肥期氨挥发量在 N 3.76 ~ 9.82 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 追肥期氨挥发量在 N 5.79 ~ 27.29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在整个夏玉米生长期, 氨挥发量随着氮肥施用量的增加而增加。施氮量为 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下, 氨挥发量相对较低, 夏玉米产量为 10 721.87 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于其他施氮水平处理的玉米产量。可见, 合理的氮肥用量能够兼顾产量和生态环境, 京郊夏玉米田间土壤在 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮肥水平下, 玉米产量最高且氨挥发损失较低。

关键词:施氮量; 氨挥发; 夏玉米; 潮土; 原位测定

氮素在农作物生产中起着关键作用。中国是世界上最大的氮肥生产和消费国, 我国农田氮素肥料的年消耗量占全球比例约为 30%。2017 年, 我国氮肥使用量已达到 2 221.8 万 t^[1]。氮肥施用量过高, 超过作物最大氮素营养吸收量, 作物产量将不再随着氮素养分施入量的增加而增加, 甚至降低作物产量, 同时导致氮肥养分大量损失, 包括氮素的土壤残留损失, 气体挥发损失, 以及随水体发生的淋洗损失, 对环境造成污染^[2-4]。华北地区(北京、河南和山东等)单位农田面积施氮量(N)高于 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 农田氮肥的利用率只有 20% ~ 40%。单位面积农田肥料氮素投入强度大, 氮素利用率低, 环境污染严重是我国华北地区氮素肥料施用现状和面临的重要问题^[5-7]。确定合理施氮量, 减少环境污染, 是现代农业生产急需解决的难题^[8]。

氨挥发损失是氮素肥料施入土壤后气态损失的主要途径^[9-10]。有研究表明, 施入土壤的氮肥通

过氨挥发形式进入大气环境损失的比例约为 1% ~ 57%^[11-13]。农田氨挥发逐渐成为农田氮素损失的研究热点, 稻田土壤发生氨挥发损失约为 4% ~ 40%^[14-17]; 串丽敏等^[18]总结了 2000 ~ 2011 年间华北、长江中下游和西北地区小麦田土壤氨挥发损失占施氮量的平均比例分别为 10.0%、7.9% 和 2.4%, 其中华北地区小麦-玉米轮作农田土壤氨挥发损失量最高可达 N 13.03 ~ 80.00 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[19]。玉米是我国主要的粮食作物之一, 冬小麦-夏玉米是主要粮食作物种植体系, 其中夏玉米季农田土壤平均施氮量(N)达到 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮肥利用率仅为 10% ~ 20%^[20-22], 且研究表明大部分氨挥发发生在夏玉米时期, 最高可达 40%^[23-27]。受农民施肥习惯、土壤性质及气候条件的影响, 华北平原中部地区潮土夏玉米季氮肥的氨挥发损失严重, 且有关华北平原中部, 特别是京郊地区夏玉米农田土壤减少氨挥发损失的研究相对缺乏。本研究以北京市房山区夏玉米农田土壤为研究对象, 采用田间原位-密闭室连续抽气法测定农田氨挥发的装置及方法, 探究该区冬小麦-夏玉米轮作体系下, 夏玉米农田土壤氨挥发损失特征, 为减少京郊农田典型土壤粮食种植体系下氮素损失, 提高氮素利用率, 确定最佳施氮量提供科学依据。

收稿日期: 2019-07-10; 录用日期: 2019-09-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200103); 北京市社科基金(18GLC048)。

作者简介: 山楠(1988-), 女, 河北唐山人, 讲师, 博士, 主要从事农业环境方面研究。E-mail: sn.47@163.com。

通讯作者: 串丽敏, E-mail: xiaochuan200506@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在北京市房山区农业科学研究所面源污染科学示范区的露天农田布置试验^[28]。供试土壤为壤质潮土。供试土壤 0 ~ 20 cm 土层有机质含量为 15.8 g · kg⁻¹、全氮含量为 0.9 g · kg⁻¹、全磷含量为 0.34 g · kg⁻¹、硝态氮为 9.6 mg · kg⁻¹、铵态氮为 3.9 mg · kg⁻¹、有效磷为 45.6 mg · kg⁻¹、速效钾为 87.7 mg · kg⁻¹、土壤 pH 值为 8.3。

1.2 试验设置

试验于原位土柱进行,微区直径 80 cm,微区面积 0.5 m²。设置 8 个处理,分别为 N0 不施氮肥处理(0), N1 (50 kg · hm⁻²), N2 (100 kg · hm⁻²), N3 (150 kg · hm⁻²), N4 (200 kg · hm⁻²), N5 (250 kg · hm⁻²), N6 (300 kg · hm⁻²), N7 (400 kg · hm⁻²)。3 次重复,24 个小区,随机排列。2013 年 6 月 20 日播种,玉米品种为中夏 2 号,播种后当天表施基肥,追肥于大喇叭口期(7 月 28 日)进行,氮肥为尿素,基肥和追肥各占 50%。磷肥和钾肥全部基施,施磷量(P₂O₅)和施钾量(K₂O)分别为 100 和 120 kg · hm⁻²。每次施肥后灌水 40 mm,共 80 mm。试验于每次施肥后进行 13 d 氨挥发监测。

1.3 土壤氨挥发测定方法

运用田间原位-密闭室连续抽气法测定氨挥发^[29],监测装置包括空气交换室、通气杆、真空抽气设备、氨吸收剂。空气交换室底端为开放的圆柱体,其材质为有机玻璃,空气交换式的顶部分别设有进气口和出气口,进气口通过螺纹管与高度为 2.5 m 的中空塑料通气杆相连,出气口与氨吸收装置相连,氨吸收剂利用真空抽气设备提供的负压

将交换室内产生的氨吸收。本研究中采用的氨吸收剂是含有混合指示剂的 1% 硼酸溶液,交换室内空气交换频率为 10 ~ 15 次 · min⁻¹,抽气结束后将吸收液带回实验室,通过标准稀硫酸滴定法来计算氨挥发量。

由于氮肥施入北方小麦-玉米轮作农田后,土壤氨挥发主要发生在施肥后的两周内^[28]。因此本试验中,施肥后每天 9:00 ~ 11:00 采集氨挥发样品,连续采集 13 d,并以 13 d 的氨挥发累积量作为夏玉米田氮肥氨挥发总排放量。

氨挥发通量计算公式:

$$\text{NH}_3\text{-N} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = M \times 10^{-2} / A \cdot T \times 24$$

其中, M 为单个采气装置平均每次测得的氨量(NH₃-N, mg); A 为捕获装置的横截面积(m²); T 为连续收集氨气的时间(h)。

1.4 数据分析

数据统计、作图采用 Excel 2016 软件,方差分析采用 SPSS 19.0 软件,所有数据结果均以 3 次重复的平均值表示。

2 结果与分析

2.1 氨挥发通量动态变化

夏玉米季氮肥基施后第 1 ~ 2 d, N0 ~ N7 处理均出现了氨挥发通量的峰值,分别为 0.43、0.59、0.76、1.24、1.27、1.27、2.35 kg · hm⁻² · d⁻¹,此后迅速下降。施肥 6 d 后,各处理的氨挥发通量低于 1 kg · hm⁻² · d⁻¹,且无明显差异,介于 0.11 ~ 0.38 kg · hm⁻² · d⁻¹ 之间(图 1)。夏玉米种植季节为每年的 6 ~ 7 月,由于日平均温度较高,尿素施入土壤迅速发生水解,随着施肥后时间的延长,氮素逐渐转化,氨挥发通量降低。

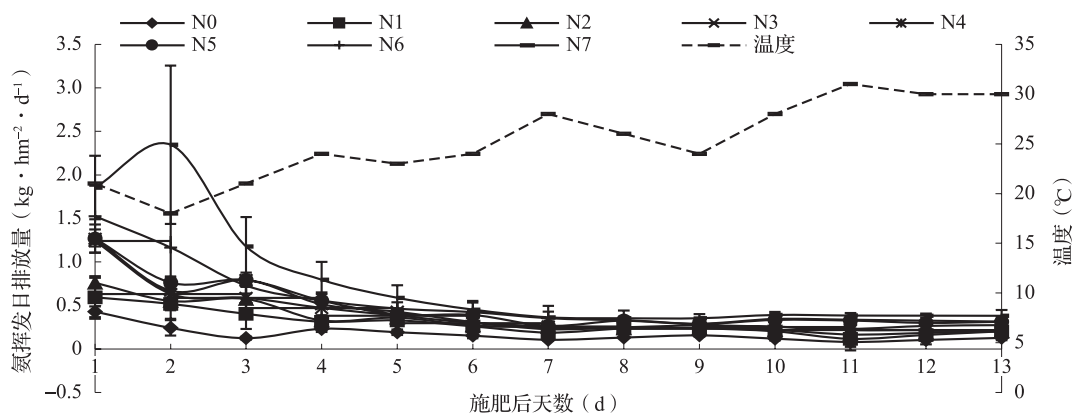


图 1 不同氮肥水平下玉米基肥时期氨挥发日排放损失规律

大喇叭口期追肥后 13 d 内最高和最低平均气温分别为 33 和 24℃ (图 2)。N0 ~ N7 处理土壤氮挥发通量在追肥后第 1 d 即出现了峰值, 分别为 0.22、0.79、2.10、2.12、2.80、2.95、4.99、5.30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 此后氮挥发通量逐渐降低, 施肥 7 d 后各处理氮挥

发通量均低于 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 13 d 后各施氮水平处理条件下土壤氮挥发日排放量趋近于 0, 且各处理差异不显著 (图 2)。玉米季追肥时期相同施氮水平条件下的土壤氮挥发日排放量的峰值均高于基肥时期的土壤氮挥发日排放量。

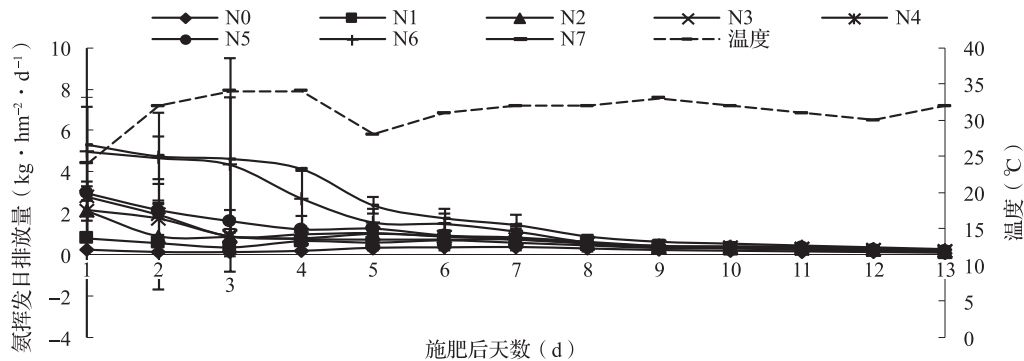


图 2 不同氮肥水平下玉米追肥时期氮挥发日排放损失规律

2.2 氮挥发累积排放量变化

夏玉米农田基施氮肥后氮挥发累积排放量变化见图 3。随着施肥天数的增加, 夏玉米田的氮挥发累积排放量随着施肥天数的延长而逐渐增加。夏玉米氮肥用量分别为每公顷 25、50、75、100、125、150、200 kg 时, 基施肥料后第 1 d 氮挥发排放量分别为 0.59、0.76、1.24、1.27、1.27、1.53、1.85 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第 1 d 损失比例 (第 1 d 的氮挥发量 / 13 d 氮挥发总量, 下同) 分别为 15.74%、17.47%、23.65%、21.99%、20.03%、21.35%、18.88%。施肥后 2 d 内的 N0 ~ N7 氮挥发累积损失比例分别

为 30.42%、29.48%、30.14%、35.70%、33.63%、32.07%、37.67%、42.77%。与第 1 d 相比, 增加了 11% ~ 23.89%。第 5 d N1 ~ N7 氮挥发累积排放量为 2.12、2.57、3.31、3.67、3.78、4.44、6.76 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮挥发累积损失比例为 57.25%、59.17%、63.19%、63.73%、59.69%、62.11%、68.83%, 达到 13 d 氮挥发总损失量的 50% 以上。京郊夏玉米季氮肥基施后 13 d 内, N0 ~ N7 土壤氮挥发累积排放量分别为 N 2.20、3.76、4.35、5.24、5.76、6.34、7.15、9.82 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

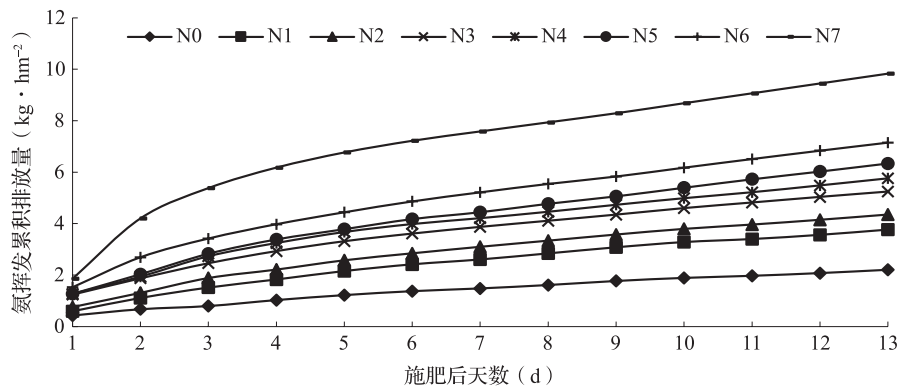


图 3 不同基施氮肥水平下夏玉米季氮挥发累积排放量

夏玉米大喇叭口期追施氮肥后, 连续进行 13 d 原位观测。土壤氮挥发累积排放量分析结果显示, 追肥后第 1 d 夏玉米田 N1 ~ N7 处理土壤氮挥发排放量分别为 0.70、2.10、2.12、2.80、

2.95、4.90、5.30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应的损失比例为 13.62%、24.77%、21.29%、24.84%、22.85%、21.47%、19.44% (图 4)。随着施肥后天数的增加, 土壤氮挥发累积排放量出现增加趋势。前 3

d N4 ~ N7 氨挥发累积排放量分别为 5.62、6.70、14.01、14.66 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，氨挥发累积损失比例分别为 49.84%、51.84%、60.32% 和 53.73%，达 13 d 氨挥发排放总量的 50%。施肥后第 5 d，除 N0 处理外，N1 ~ N7 氨挥发累积排放量分别为 2.92、5.26、6.49、7.66、9.14、18.28、21.15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，氨挥发累积损失比例为 50.48% ~ 78.71%，均占 13 d 氨

挥发累积总损失量的 50% 以上。基肥和追肥期间，前 7 d 内 N1 ~ N7 的氨挥发累积损失比例分别为 69.20% ~ 77.15% 和 72.42% ~ 89.03%。除 N0 外，70% ~ 90% 左右的氨挥发损失是发生在施肥后前 7 d，因此在夏玉米种植期间，氮肥施用后的一周内，为该体系农田土壤发生氨挥发损失的主要时期。

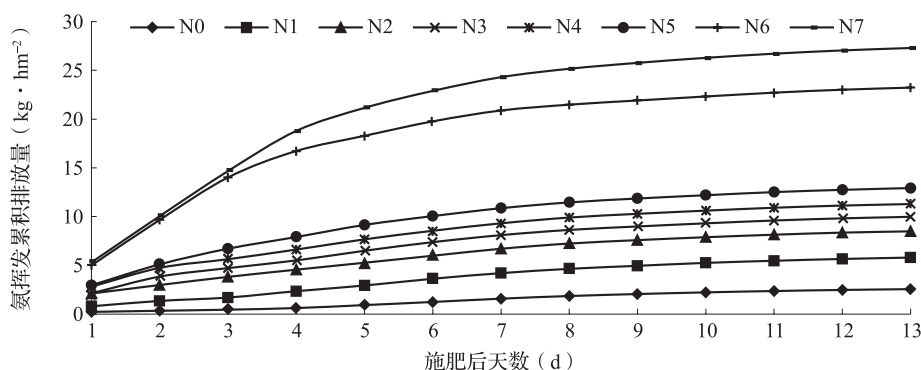


图 4 不同追施氮肥水平下夏玉米季氨挥发累积排放量

夏玉米生长期间气温较高，增加了氮素肥料施入土壤后的氨挥发损失（图 5）。本试验条件下，N0 ~ N7 处理夏玉米季农田土壤氨挥发损失总量分别为 3.01、4.35、5.91、9.46、11.03、12.51、14.87 和 21.20 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其中 N1 ~ N7 处理分别占氮肥施用的比例为 9.59%、8.08%、6.97%、6.14%、5.80%、8.54% 和 8.09%，氨挥发总量随着氮肥施用量的增加而增加，其中 N5 处理氨挥发损失率最低，为 5.80%，可能由于 N5 处理氨挥发损失量未与施

氮量成比例增加。在基肥试验期间，N0 氨挥发损失量为 2.20 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，N1 ~ N7 处理的氨挥发总量分别为 3.76、4.35、5.24、5.76、6.34、7.15 和 9.82 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，分别占施氮量的 2.15%、2.03%、1.78%、1.65%、1.65%、1.91% 和 6.74%，氨挥发损失量随着施肥量的增大呈现递增的态势。以氨挥发损失量为因变量，基施氮肥用量为自变量，经过回归分析得出，基施氮肥期间，玉米氨挥发损失量与基施氮肥用量存在线性关系： $y=2.481+0.034x$ ($R^2=0.987$ ，

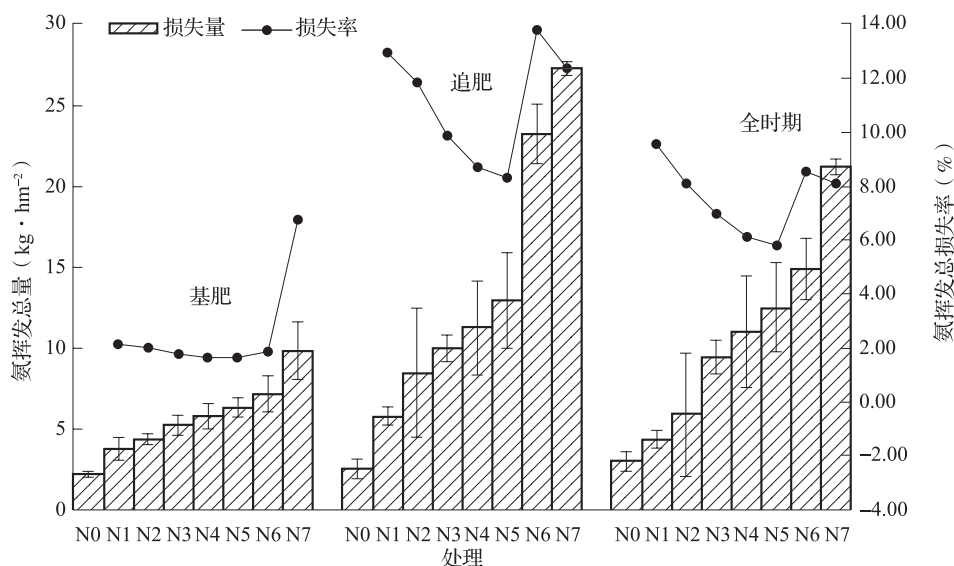


图 5 不同氮肥水平下玉米季氨挥发总损失规律

$P<0.01$), 式中, y 为基肥期间土壤氨挥发损失量, x 为基施氮肥用量。结果表明, 夏玉米季氮肥基施入土壤后, 土壤氨挥发损失量随着氮肥施用量的增加而增加。

追肥试验期间, N_0 氨挥发损失量为 $2.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $N_1 \sim N_7$ 处理的氨挥发总量分别为 5.79、8.48、9.97、11.28、12.92、23.23、27.29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别占施氮量的 12.95%、11.86%、9.89%、8.73%、8.30%、13.78% 和 12.37%。氮肥施用量越高, 氨挥发量越大。经过回归分析得出, 夏玉米大喇叭口期追肥后土壤氨挥发损失量与氮肥施用量呈曲线方程关系: $y=3.270+0.068x+0.0002x^2+2.095 \times 10^{-7}x^3$ ($R^2=0.972$, $P<0.01$), 式中, y 为追肥期间土壤氨挥发损失量, x 为追施氮肥用量。追施氮肥期间, 氨挥发损失量占氮肥施用量的比例情况与氨挥发损失总量不同, 其中 N_4 、 N_5 处理氨挥发损失率最低, 分别为 8.73% 和 8.30%, N_1 最高 (12.95%)。夏季高温天气的出现, 导致玉米季氮肥施入土壤迅速分解, 以氨挥发的形式排放, 追肥期间土壤氨挥发损失高于基肥时期。

2.3 夏玉米产量与氨挥发量分析

随着施氮量的增加, 夏玉米种植体系的土壤

氨挥发总量呈线性增加趋势 (图 6)。整个生育期 $N_0 \sim N_7$ 氨挥发量分别为 4.75、9.55、12.83、15.21、17.04、19.26、30.38、37.12 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同氮肥水平条件下 ($N_0 \sim N_7$) 夏玉米产量曲线符合方程式: $y=-0.000003x^2+0.0011x+0.4046$ ($R^2=0.7906$)。当施肥量为 $217.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 玉米产量最高, 为 $10316.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

以氨挥发总量为因变量, 氮肥施用量为自变量, 经过回归分析得出, 氨挥发总量与氮肥施用量符合曲线关系: $y=0.00008x^2+0.0456x+5.989$ ($R^2=0.9644$, $P<0.01$), 式中, y 为夏玉米土壤氨挥发总量, x 为氮肥施用量。结果表明, 氨挥发损失量随着氮肥施用量的增加而增加。在该试验条件下, 氮肥施用量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_4 处理) 时, 玉米产量为 $10721.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于其他处理, 且氨挥发损失率最低。氮肥施用可以增加夏玉米的产量, 当氮肥的施用量超过作物对氮素营养的阈值时, 作物产量不再增加, 出现下降的趋势。综合玉米的产量和氨挥发损失情况, 夏玉米季当氮肥的施用量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 降低了作物的经济效益, 氮素施入土壤后发生的氨挥发损失值得关注。

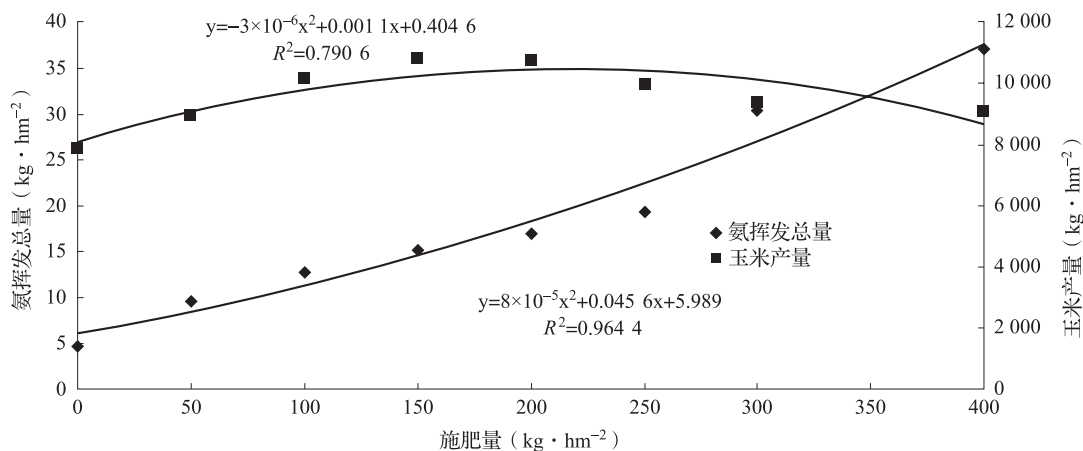


图 6 玉米产量、氨挥发总量与施肥量变化趋势

3 讨论

施肥主要影响表层土壤的铵态氮总浓度, 从而影响氨挥发速率。本试验共有 2 个不同的施肥时期, 一个时期是在夏玉米季以基肥的方式施入, 其余是在大喇叭口期以追肥的方式施入。对比不同施肥时期土壤表面氨挥发排放情况, 结果表明: 夏玉米基肥和追肥时期, 氨挥发通量均于 1 ~ 2 d 内达到最高值, 播种后基肥氨挥发通量介

于 $0.43 \sim 2.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。大喇叭口期追肥后氨挥发通量介于 $0.22 \sim 5.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 然后逐渐下降。 $N_0 \sim N_7$ 不同氮肥水平处理条件下夏玉米追肥后氨挥发通量峰值高于基肥时期。夏玉米基肥后氨挥发损失量为 $2.20 \sim 9.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占氮损失比例为 1.65% ~ 3.12%。大喇叭口期追肥后氨挥发损失量介于 $2.55 \sim 27.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占氮损失比例为 8.30% ~ 12.95% (图 3 ~ 4)。与玉米季氮肥基施后氨挥发连续监测结果比较, 各施氮水平

处理 (N0 ~ N7) 的土壤氨挥发累积量在氮肥追施后这一时期均表现出较高的数据结果, 即土壤氨挥发损失总量夏玉米追肥高于基肥, 且追肥时期土壤氨挥发日排放量和累积氨挥发量均较大。根据京郊地区耕作习惯, 夏玉米季追肥时期为每年 7 月底至 8 月初, 为全年日平均气温最高的时期, 可能是导致夏玉米季追肥时期土壤氨挥发量大于基肥时期氨挥发量的主要原因。气象条件 (温度、风速、降水等) 是影响田间氨挥发的主要气候因素之一^[29-30]。桑蒙蒙等^[31]研究长江中下游地区夏玉米季农田土壤损失得出, 夏玉米季追肥时期土壤氨挥发损失率为 15.1%, 基肥时期为 5.2%, 追肥时期土壤氨挥发损失是基肥时期的约 3 倍, 与本研究结果相似。曹欢欢^[32]研究指出, 在夏玉米整个生育期中, 氨挥发损失表现为追肥时期 > 基肥时期, 追肥时期是玉米季氨挥发损失的主要时期, 氨挥发损失量占该时期施氮量的比例为 2.97% ~ 4.41%。胡春胜等^[33]总结华北地区长期试验发现, 冬小麦 - 夏玉米轮作期间不同时期施肥造成的氨挥发损失存在差异, 玉米追肥后, 由于气温高、土壤温湿度大, 利于氨挥发, 此期氨挥发损失量最高, 达 $41.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占施入肥料量的 26.6%。本研究中京郊潮土种植夏玉米土壤氨挥发损失量达 $27.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占氮肥使用量的 12.37%。不同施肥处理氨挥发损失量存在较大差异, 高施氮量处理, 氨挥发量显著高于其他处理。70% ~ 90% 左右的氨挥发损失是发生在施肥后一周内。京郊地区夏玉米种植时间为每年的 6 月, 日平均气温均已达到 20°C 以上, 整个夏玉米生长季为炎热的夏季, 土壤温度达 $20 \sim 35^\circ\text{C}$, 高温条件下尿素迅速发生水解, 促进土壤氨挥发排放, 因此无论是高氮施肥处理还是低氮施肥处理, 京郊夏玉米季农田均表现出土壤氨挥发强度高, 且高峰期持续时间较短的现象。观测发现, 施肥 6 ~ 7 d 后, 不同水平施肥处理的土壤氨挥发速率已无明显差异。结果还表明, 高氮施肥处理土壤氨挥发累积总量大于低氮施肥处理, 氮肥施用是农田土壤发生氮素氨挥发损失主要途径, 且与氮肥施用量成正比。因此, 适当控制氮肥投入, 优化氮肥施用方法 (合理氮肥用量、肥料深施、施肥后立即灌溉或者施用缓控肥等) 可以在氨挥发损失严重的玉米季降低土壤氨挥发损失。

影响氨挥发损失的因素还有土壤性质、施肥方式、耕作方式以及种植作物等^[34-36]。研究显示, 尿素

施入稻田土壤, 氨挥发损失为 0.41% ~ 40%^[13, 37-38]; 华北地区小麦生长季氨挥发损失量平均值为 $19.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18]。本试验结果通过原位 - 密闭室连续抽气法测定得出, 潮土夏玉米季农田土壤氨挥发量为 $15.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于潮土种植小麦土壤氨挥发损失量 $9.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[25]。多数学者经过长期研究发现, 华北地区小麦 - 玉米轮作体系中, 玉米季由于高温、高湿更有利于氨挥发, 占玉米季施氮总量的 25.8%, 而小麦季氨挥发损失率约为 17.8%^[39-43]。董文旭等^[23]研究表明小麦 - 玉米轮作体系中 80% 的农田土壤氨挥发发生在夏玉米时期。夏玉米季土壤氨挥发损失情况受到土壤性质影响显著。长江中下游地区壤质黏土 (pH 值 6.1) 夏玉米季土壤氨挥发损失率为 10.2%^[31]; 焉莉^[44]研究东北黑土 (pH 值 6.63) 种植玉米过程中氮素肥料损失特征发现, 以氨挥发形式损失的氮素养分为 5.9% ~ 7.6%, 低于本试验中损失率为 9.60% ~ 16.18% 的结果。由于京郊属于华北地区, 农田土壤为潮土, 偏碱性 (pH 值 8.3), pH 值较高, 有利于水溶态 NH_3 形成, 促进土壤氨挥发排放^[45]。董怡华等^[46]研究不同尿素配施处理下草甸棕壤氨挥发特性时发现, 土壤氨挥发速率与土壤 pH 值呈正相关。由于华北地区土壤多属石灰性土壤, pH 值较高, 一般认为华北地区氮肥施用后的氨挥发损失较高。

不同的氨挥发测试方法也是造成氨挥发损失结果差异的因素之一。苏芳等^[47]在北京地区肥力较高的石灰性潮土上运用风洞法研究小麦 - 玉米轮作体系过程中氨挥发损失规律发现, 夏玉米季土壤氨挥发损失率高达 44.0%。董文旭等^[48]在粉壤土 (pH 值 8.2) 进行冬小麦 - 夏玉米农田氮肥氨挥发损失研究发现, 玉米追肥期氨挥发损失量占施肥的 5.8% ~ 9.6%。谢迎新等^[49]在河南地区砂壤质潮土 (pH 值 8) 中采用海绵通气法进行夏玉米季土壤氨挥发规律试验, 发现氨挥发损失占氮肥使用量的 8.0% ~ 11.9%; 而张翀等^[26]运用风洞法和密闭室连续抽气法发现川中丘陵紫色土 (pH 值 8.3) 地区, 夏玉米季土壤氨挥发损失率分别高达 41.9% 和 48.4%; 周丽平等^[50]运用通气法研究 2014 ~ 2015 年间华北地区中不同氮肥施用对潮土种植夏玉米过程中土壤氨挥发影响发现, 土壤氨挥发损失率为 3.6% ~ 17.3%, 与本研究基于北京典型农耕土壤类型壤质潮土上进行的试验结果相近, 玉米季农田土壤氨挥发损失率为 9.60% ~ 16.18%。李欠欠

等^[51]运用DTM法研究长武(土壤类型为黑垆土, pH值8.3)、梨树(土壤类型为黑土, pH值5.5)两个地区春玉米土壤氮挥发规律发现, 土壤氮挥发损失占氮肥使用量的比例分别为16.2%和21.9%, 说明pH值较高的土壤类型, 较易发生氮挥发排放损失, 氮挥发测试结果的精确性受农田土壤氮挥发的测试方法的限制。根据当地土壤性质和作物类型, 适宜的施肥量是减少土壤氮素氮挥发损失的有效途径。

4 结论

(1) 通过原位土柱微区试验, 采用氮挥发原位测定方法, 得出京郊地区壤质潮土种植夏玉米过程中, 氮肥施用可显著增加土壤氮挥发损失, N0 ~ N7不同氮肥施用水平下, 基肥和追肥后均于施肥后1 ~ 2 d内达到氮挥发通量的最大值, 分别介于0.43 ~ 2.35和0.22 ~ 5.30 kg · hm⁻² · d⁻¹之间, 此后逐渐下降, 各处理趋于平稳, 无显著差异, 均小于1 kg · hm⁻² · d⁻¹。

(2) 京郊夏玉米种植体系中, 玉米季土壤基肥时期各施氮水平处理条件下N0 ~ N7土壤氮挥发总量为2.20 ~ 9.82 kg · hm⁻², 低于追肥时期(2.55 ~ 27.29 kg · hm⁻²); 均在施肥后的第1 ~ 2 d内达到氮挥发通量的最大值, 施肥后一周内土壤氮挥发损失总量占整个施肥时期的70% ~ 90%。

(3) N1 ~ N7处理中7个不同氮肥施用条件下, 整个夏玉米季农田土壤氮挥发总量为4.75 ~ 37.12 kg · hm⁻², 损失率为9.60% ~ 16.18%, 作物产量为7 815.82 ~ 10 774.95 kg · hm⁻²。合理氮肥施用量不仅可以提高作物产量, 提高氮肥利用率, 减少氮素挥发损失, 降低环境污染风险, 实现经济效益与环境效益双赢。本试验中氮肥施用量为200 kg · hm⁻²(N4处理)时, 玉米产量最高, 为10 721.87 kg · hm⁻², 氮挥发损失比例较低, 为6.14%, 是本试验条件下较为合理的氮肥用量。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] Gu L, Liu T, Wang J, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of Northern Chinese wheat[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 473-474.
- [3] Zhou Y, Zhang Y, Tian D, et al. Impact of dicyandiamide on emissions of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia from

agricultural field in the North China Plain[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 40(2): 20-27.

- [4] 徐钰, 刘兆辉, 朱国梁, 等. 不同农业管理措施对华北地区麦田温室气体排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (2): 7-13.
- [5] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: A review[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2848-2862.
- [6] Ju X, Liu X, Zhang F, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. Ambio, 2004, 33(6): 300-305.
- [7] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 10-22.
- [8] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [9] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 310-315.
- [10] Kang Y, Liu M, Song Y, et al. High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(4): 2043-2058.
- [11] Peng X, Zhang Y, Gong W, et al. An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution[J]. Atmospheric Environment, 2015, 115: 141-148.
- [12] Tian G 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.
- [13] Zhu Z L. Efficient management of nitrogen fertilizers for flooded rice in relation to nitrogen transformations in flooded soils[J]. Pedosphere, 1992(2): 97-114.
- [14] Yang Q, Liu P, Dong S, et al. Effects of fertilizer type and rate on summer maize grain yield and ammonia volatilization loss in northern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19: 2200-2211.
- [15] 刘威, 周剑雄, 谢媛圆, 等. 控释尿素条施深度对鲜食玉米田间氮挥发和氮肥利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1295-1302.
- [16] 田玉华, 曾科, 尹斌. 基于不同监测方法的太湖地区稻田基肥期氨排放研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1180-1189.
- [17] 田玉华, 曾科, 姚元林, 等. 基于不同监测方法的太湖地区水稻穗肥期氨排放研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 693-702.
- [18] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 等. 中国小麦季氮素养分循环与平

- 衡特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (1): 76–86.
- [19] 沈仕洲, 张克强, 王风, 等. 基于 RZWQM 模型的华北平原冬小麦–夏玉米土壤硝态氮淋溶和氨挥发评估方法研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (9): 3–9.
- [20] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33 (9): 1858–1865.
- [21] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143 (1): 117–125.
- [22] 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用 ^{15}N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (4): 930–936.
- [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.
- [24] 刘敏, 张翀, 何彦芳, 等. 追氮方式对夏玉米土壤 N_2O 和 NH_3 排放的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (1): 19–29.
- [25] 王志国, 刘培, 邵宇婷, 等. 减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米农田氮平衡的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (11): 1643–1652.
- [26] 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.
- [27] 宋梓璇, 李虎, 李建政, 等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (10): 2342–2349.
- [28] 山楠. 京郊小麦—玉米轮作体系氮素利用与损失研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [29] 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.
- [30] Denmead O T. Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field [M] // Gaseous loss of nitrogen from plant–soil systems. Springer Netherlands, 1983: 133–157.
- [31] 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 等. 常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例 [J]. 环境科学, 2015, (9): 3358–3364.
- [32] 曹欢欢. 旱地夏玉米–小麦轮作体系尿素氨挥发研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [33] 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): 82–95.
- [34] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究 [J]. 土壤学报, 2004, 41 (2): 265–269.
- [35] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (3): 46–48.
- [36] 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.
- [37] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 农业源氨排放影响因素研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2016, (6): 870–878.
- [38] 李贞宇, 王旭, 魏静, 等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价 [J]. 环境科学学报, 2010, 30 (9): 1912–1920.
- [39] 丁新泉. 华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [40] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 21 (3): 417–419.
- [41] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 利用 Bowen 比测定大面积农田土壤氨挥发的方法研究 [J]. 中国农业大学学报, 2001, 6 (5): 56–62.
- [42] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发 [J]. 华北农学报, 2002, 17 (1): 76–81.
- [43] 马艳丽, 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.
- [44] 焉莉. 不同施肥管理对东北玉米连作地农业面源污染影响研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [45] Mengel K, Robin P, Salsac L. Nitrate reductase activity in shoots and roots of maize seedlings as affected by the form of nitrogen nutrition and the pH of the nutrient solution [J]. *Plant Physiology*, 1983, 71 (3): 618–622.
- [46] 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): 2943–2949.
- [47] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 等. 华北平原冬小麦–夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发 [J]. 中国环境科学, 2007, 27 (3): 409–413.
- [48] 董文旭, 胡春胜, 陈素英, 等. 保护性耕作对冬小麦–夏玉米农田氮肥氨挥发损失的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46 (11): 2278–2284.
- [49] 谢迎新, 刘园, 靳海洋, 等. 施氮模式对砂质潮土氨挥发、夏玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. 玉米科学, 2015, (2): 124–129.
- [50] 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.
- [51] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 571–579.

Ammonia volatilization from maize cropland under different N applications at a rural area of central Northern China Plain

SHAN Nan¹, ZHAO Tong-ke³, DU Lian-feng³, AN Zhi-zhuang³, HE Yan-jie¹, HAO Yu-cui¹, SUN Xiu-jun¹, CHUAN Li-min^{2*} (1. Department of Environmental and Chemical Engineering, Tangshan University, Tangshan Hebei 063000; 2. Institute of Agricultural Information and Economics, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097; 3. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097)

Abstract: The effects of different urea levels on seasonal ammonia volatilization of summer maize were studied in the fluvo-aquic soils in the central part of North China Plain, which provided a basis for rational application of nitrogen fertilizer and reduction of ammonia volatilization loss in farmland. Combining with the local farmers' planting and nitrogen application habits, eight levels of nitrogen application were set up, namely 0 (N0), 50 (N1), 100 (N2), 150 (N3), 200 (N4), 250 (N5), 300 (N6) and 400 (N7) kg · hm⁻². Ammonia volatilization was determined by in situ determination and continuous air extraction in closed chamber. The results showed that significant ammonia volatilization occurred in summer maize planting system after applying nitrogen fertilizer, and ammonia volatilization mainly occurred within 5 days after applying fertilizer. The peak ammonia volatilization rate appeared 1 ~ 3 days after applying fertilizer. The maximum ammonia volatilization flux of base fertilizer and topdressing reached N 2.35, 5.30 kg · hm⁻² · d⁻¹, respectively, and the ammonia volatilization amount of base fertilizer were N 3.76 ~ 9.82 kg · hm⁻² and N 5.79 ~ 27.29 kg · hm⁻² ammonia volatilization during topdressing. During the whole growth period of summer maize, ammonia volatilization increased with the increase of nitrogen fertilizer application. Ammonia volatilization was relatively low under 200 kg · hm⁻² nitrogen application. The yield of summer maize was 10 721.87 kg · hm⁻², which was higher than that of other nitrogen application treatments. It can be seen that a reasonable amount of nitrogen fertilizer can take into account both yield and ecological environment. Under 200 kg · hm⁻² nitrogen fertilizer level in summer maize field in Beijing suburb, the yield of summer maize is the highest and the loss of ammonia volatilization is relatively low.

Key words: nitrogen fertilization application; ammonia volatilization; summer maize; fluvo-aquic soil; in situ determination