

有机替代下华北平原旱地农田氨挥发的年际减排特征

张怡彬¹, 李俊改¹, 王震¹, 戴孚岳², 翟丽梅¹, 杨波¹, 王洪媛^{1*}, 刘宏斌¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081;

2 中国农业大学烟台研究院, 山东烟台 261400)

摘要:【目的】农田氨挥发是大气中氨的重要来源, 其减排措施研究已成为国际研究热点。有机肥替代化肥的农田氨挥发减排潜力已得到广泛认可, 然而年际间气候变化对其减排能力的影响研究报道较少。通过研究年际间有机替代对作物产量和氨挥发损失量的影响, 为华北地区科学减少氨挥发损失提供理论依据【方法】本研究基于华北平原玉米长期田间定位试验(2007年设置), 针对不同施肥处理开展了连续3年(2017—2019年)的氨挥发监测, 以明确年际间气候变化对有机替代氨挥发减排潜力的影响强度。试验共设置4个处理: 不施氮肥处理(PK)、单施化肥处理(NPK)、半量有机肥氮替代化肥氮处理(HONS)、全量有机肥氮替代化肥氮处理(FONS)【结果】有机替代可以提高玉米产量, 与NPK处理相比, HONS处理和FONS处理的玉米产量分别提高20.7%和30.9%。不同施氮处理的氮素偏生产力在35.6~46.7 kg/kg, 与NPK处理相比, HONS处理和FONS处理的氮素偏生产力分别提高20.8%和30.9%。年际间和各处理间的氨挥发规律基本一致, 都是在施肥后的第2~4天出现排放峰值, 之后氨挥发速率逐渐降低, 并在9天内基本趋于稳定。施肥前后9天是农田氨挥发的主要排放时期, 氨挥发量占基肥期氨挥发总量的70.1%; 占追肥期的63.7%。华北平原春玉米农田氨挥发损失量较低(10.6 kg/hm²), 有机替代能够进一步显著降低农田氨挥发损失。与NPK处理相比, HONS和FONS处理对氨挥发损失的减排率平均分别可达33.5%和58.7%。有机替代处理农田氨挥发的年际间变化显著高于单施化肥处理。相比氨挥发损失较低的2019年, 2018年NPK处理的氨挥发损失增加了12.3%, 而HONS处理和FONS处理分别增加了91.2%和105.0%, 相应的HONS处理和FONS处理的减排率, 从2019年的54.3%和71.1%, 降低到22.1%和47.2%。主成分分析表明, 年际间大气温度变化和土壤湿度变化是导致年际间氨挥发损失量差异的主要原因。【结论】相比单施化肥, 有机肥替代化肥能够提高作物产量; 相比半量有机替代, 长期全量有机肥替代化肥对作物产量的提升能力更强。华北平原旱地农田有机替代能有效降低氨挥发损失, 但在氨挥发损失较高年份有机替代的减排潜力会减弱, 因此, 有机替代氨挥发减排潜力的估算需要考虑年际间的变化。

关键词: 华北平原; 有机氮替代; 年际间差异; 氨挥发损失量; 作物产量

Substitution of chemical fertilizer with organic manure reduces ammonia volatilization in maize farmland in North China Plain

ZHANG Yi-bin¹, LI Jun-gai¹, WANG Zhen¹, DAI Fu-yue², ZHAI Li-mei¹,

YANG Bo¹, WANG Hong-yuan^{1*}, LIU Hong-bin¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

2 China Agricultural University Yantai Institute, Yantai, Shandong 261400, China)

Abstract: 【Objectives】Ammonia volatilization in farmland contributes to the atmospheric ammonia, thus the need and methods for reducing ammonia volatilization in farmland have become part of the trending international research topics. Substitution of chemical fertilizers with organic fertilizers is a widely recognized method for reducing ammonia volatilization in farmland. The impact of inter-annual climate change on emission reduction capacity of organic fertilizers was studied in this paper. 【Methods】This study was conducted in a long-term

收稿日期: 2020-06-22 接受日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972519); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019037, 1610132016005)。

联系方式: 张怡彬 E-mail: zhangyibin10@126.com; *通信作者 王洪媛 E-mail: wanghongyuan@caas.cn

experimental maize field in North China Plain. The experiment commenced in 2007, and ammonia volatilization monitoring was conducted in three consecutive years (2017–2019). There were four treatments in the experiment, as: no N fertilizer (PK), single chemical fertilizer (NPK), half of the organic N replacing chemical fertilizer N (HONS), full amount of organic N replacing chemical fertilizer N (FONS). 【 **Results** 】 The substitution of chemical fertilizers with manure increased the maize yield. Compared with NPK treatment, HONS and FONS treatments increased the maize yield by 20.7% and 30.9%, respectively. The partial N productivity of the different treatments ranged from 35.6 to 46.7 kg/kg. Compared with NPK treatment, HONS and FONS treatments increased the partial N productivity by 20.8% and 30.9%, respectively. The ammonia volatilization pattern among years and treatments was the same, with the peak ammonia volatilization appeared in 2–4 days after fertilization, and then gradually decreased and stabilized within 9 days. About 70.1% and 63.7% of the total ammonia volatilization occurred in the first 9 days after basal application and topdressing of fertilizer, respectively. Compared with NPK treatment, HONS and FONS treatments reduced ammonia volatilization by average of 33.5% and 58.7%, respectively. The inter-annual change in ammonia volatilization in HONS and FONS treatments were significantly higher than that of chemical fertilizer. The ammonia volatilization in NPK treatment was 12.3% higher in 2018 than that in 2019, while volatilization in HONS and FONS treatments were higher (91.2% and 105.0%, respectively) in 2018 than that in 2019. The corresponding reduction rates in HONS and FONS treatments were higher in 2019 than 2018 (54.3% vs. 22.1% and 71.1% vs. 47.2%, respectively). Principal component analysis showed that the variations of air temperature and soil moisture were the main reasons for the differences in ammonia volatilization. 【 **Conclusions** 】 Compared with sole application of chemical fertilizers, the replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers can increase crop yields. Full-scale replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers has a stronger potential to improve crop yields over time than partial replacement. More importantly, results of this study suggest that the substitution of chemical fertilizers with organic fertilizers could effectively reduce ammonia volatilization in North China Plain, but the reduction rate could vary among years.

Key words: North China Plain; substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen; inter-annual differences; ammonia volatilization loss; crop yield

大气中的氨 (NH_3) 是形成 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物, $\text{PM}_{2.5}$ 是造成雾霾的主要组成成分^[1-3]。近年来, 由氨挥发引起的雾霾污染已引起了越来越广泛的关注。有研究表明, 2010 年有 177 万人因 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露而过早死亡, 空气污染已严重影响人类健康^[4]。An 等^[5]的模拟研究结果表明, 2015 年的一次严重雾霾事件期间, 约 30% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量可归因于农业氨。

我国氮肥施用量大, 其中有 10%~30% 会通过氨挥发形式损失^[6]。有研究表明, 全国主要粮食作物氨挥发损失量和损失率分别为 $\text{N } 20.7 \text{ kg/hm}^2$ 和 11.2%^[7]。华北平原是我国小麦、玉米等旱地作物的主产区, 该地区氮肥投入量大, 施用化肥产生的氨挥发量占全国的 43%^[8]。

已有研究表明, 有机肥替代化肥可以提高作物产量, 降低农田氨挥发。与单施化肥相比, 在包菜季和小青菜季, 25% 有机替代可以降低 23.4% 和 41.6% 的氨挥发量^[9]; 李燕青等^[10]在冬小麦和夏玉米上的研究表明, 与单施化肥相比, 50% 的猪粪、牛粪替代

化肥可以降低玉米季氨挥发量的 52.9% 和 52.0%; 郑凤霞等^[11]4 年的冬小麦大田试验表明, 与单施化肥相比, 半量有机替代可以降低氨挥发量 30.7%; Zhang 等^[12]的 meta 分析结果表明, 完全有机替代可降低 62%~77% 的氨, 部分有机替代也可降低氨挥发损失, 但是还取决于具体条件。试验时间、地点以及气候环境等条件都会对氨挥发产生影响。周静等^[12]的田间试验结果表明, 春秋二季基肥氨挥发总量和通量均与气温、气压、蒸发量和土温等环境气象因子有较好的相关性 ($P < 0.05$)。也有研究表明, 在 pH 大致不变的情况下, 在 5°C ~ 35°C 的范围内, 温度每上升 10°C , 氨损失量的比例约增加 1 倍^[13]。但是年际间气候变化对特定区域有机替代的氨挥发减排效果的影响仍缺乏研究。

本研究基于华北平原春玉米长期定位试验, 以全量化肥、半量有机替代和全量有机替代等 3 种有机肥替代比例, 系统研究年际间有机替代对作物产量和氨挥发损失量的影响, 以期对华北地区科学减

少氨挥发损失提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于北京市昌平区“北京昌平土壤质量国家野外科学观测研究站”(40.22°N、116.23°E), 海拔高度为 43.5 m, 年平均温度为 11.5℃, 大于等于 10℃ 的积温为 4500℃, 年降雨量和蒸发量平均分别为 625 和 1065 mm, 无霜期为 210 天, 春旱和夏季暴雨是该地点的主要灾害性天气, 全年 80% 以上的降雨天气集中在每年的 6—10 月份, 且不同年份之间降雨差异很大。在 2017—2019 年春玉米种植季, 昌平基地气温及降雨状况见图 1。

1.2 试验设计

本研究通过肥料长期定位试验进行, 该定位试验于 2007 年开始布置实施, 距今已有 13 年。小区规格为 1 m (宽) × 2 m (长) × 1.2 m (深), 四周均由混凝土包围而成。该研究种植模式为春玉米—冬闲田, 品种为京单 28, 发芽率 ≥ 85%, 种植密度为 60000 株/hm²; 试验地的土壤类型为褐潮土, 基础理化性质如表 1 所示。试验共设置 4 个处理: PK (不施氮处理)、NPK (常规处理)、HONS (一半化肥氮被有机氮替代, half organic nitrogen substitution)、FONS (全部化肥氮被有机氮替代, full organic nitrogen substitution), 每个处理 3 次重复, 共 12 个小区, 完全随机排列。试验所用磷肥和钾肥分别为磷酸二氢钾 (P₂O₅ 52.1%) 和硫酸钾 (K₂O 50.0%); 有机肥为干猪粪, 在播种前一次性施入。猪粪的基础性质为: 总氮 (TN) 25.1 ± 0.1 g/kg、总磷 (P₂O₅) 55.3 ± 0.1 g/kg、总钾 (K₂O) 24.9 ± 0.3 g/kg, pH 6.7。HONS 和

FONS 处理根据猪粪 N 含量确定猪粪用量, 并计算猪粪携入的磷钾量, 剩余养分用尿素、磷酸二氢钾 (52.1% P₂O₅) 和硫酸钾 (50.0% K₂O) 补齐, 达到和单施化肥处理相同的氮磷钾施用量。尿素按照 37.5% 基肥、62.5% 追肥 (小喇叭口期) 的比例施入, 施肥方式均为撒施后翻耕, 具体施肥措施见表 2。2017—2019 播种与收获时间分别为 2017 年 5 月 25 日和 9 月 21 日、2018 年 5 月 29 日和 9 月 14 日、2019 年 5 月 31 日和 9 月 24 日。

1.3 氨挥发的采集与测定

采用间歇密闭通气法, 采集春玉米生育期氨挥发样品^[14-15]。该方法的原理是利用透明有机玻璃制成的密闭室的通气孔与装有稀硫酸吸收液 (40 mL, 0.05 mol/L) 的气体洗瓶相连, 洗瓶的另一端与真空抽气泵相连, 通过真空抽气泵使密闭室减压, 使密闭室内的氨随空气流动进入稀硫酸吸收液, 抽气结束后, 收集稀硫酸吸收液, 利用连续流动分析仪 (AA3) 测定吸收的 NH₄⁺ 浓度。为防止土壤扰动影响监测结果, 在春玉米施基肥之前, 将装置固定于春玉米植株的间隙中。该装置的材质是厚度为 3 mm 的聚氯乙烯 (PVC) 板; 底座规格为内径 25 cm、外径 31.5 cm、埋深 20 cm; 密闭盖的规格为内径 26 cm、高 15 cm。施肥后 1、2、3、4、6、8、10、13、15、18、21 天……, 采集氨挥发样品, 直至 NPK、HONS 和 FONS 等处理的氨挥发数据与 PK 处理基本相同时结束监测。测定前, 在底座的槽里添加水以起到密封的作用, 然后将密闭盖置于底座上, 确保换气速率为 15~20 次/min, 每次取样在当天上午 9:00—11:00 和下午 15:00—17:00 进行, 氨挥发速率、氨挥发累积损失量和氨挥发系数计算公式如下:

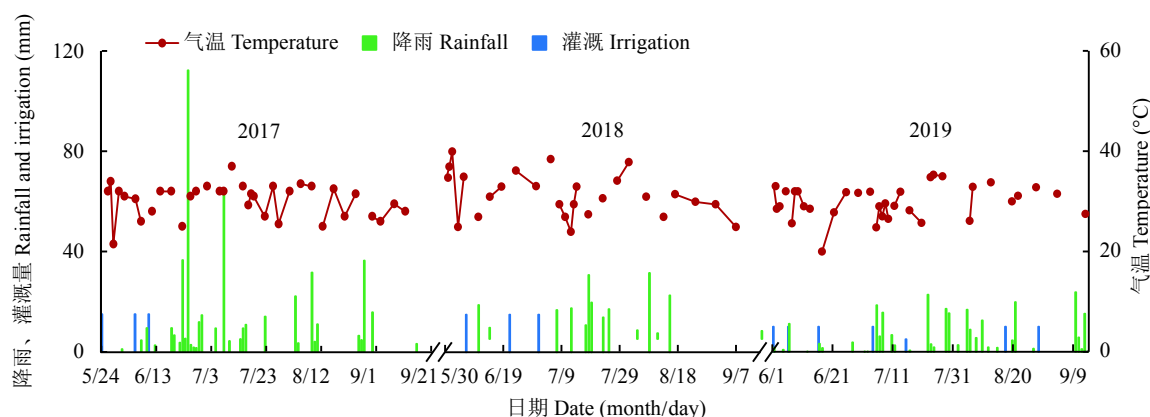


图 1 2017—2019 年春玉米全生育期的气温和降雨、灌溉量

Fig. 1 The temperature, rainfall and irrigation during the three experimental years

表 1 土壤基础理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

处理 Treatment	有机质 SOM (g/kg)	总氮 Total N (g/kg)	硝态氮 NO ₃ -N (mg/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm ³)	pH
PK	14.47 ± 0.40 c	0.89 ± 0.04 b	3.83 ± 0.02 c	1.08 ± 0.01 a	1.32	8.2
NPK	16.68 ± 0.09 b	0.9 ± 0.04 b	5.07 ± 0.11 b	1.52 ± 0.03 b	1.32	8.3
HONS	18.02 ± 0.14 a	1.07 ± 0.09 b	6.22 ± 0.04 a	2.46 ± 0.09 d	1.32	8.2
FONS	18.24 ± 0.13 a	1.32 ± 0.11 a	5.18 ± 0.04 b	1.84 ± 0.06 c	1.32	8.2

注 (Note): 表中数据为3年的平均值 ± 标准差, 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) The data in the table are the three-year average ± standard deviation. Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 2 各处理的施肥量
Table 2 The fertilizer application rates of each treatment

处理 Treatment	尿素氮 Urea-N (kg/hm ²)		猪粪氮 (kg/hm ²) Pig manure N	总氮 (kg/hm ²) Total N	总磷 (kg/hm ²) Total P ₂ O ₅	总钾 (kg/hm ²) Total K ₂ O
	基肥 Basal	追肥 Top-dressing				
PK	0	0	0	0	120	180
NPK	90	150	0	240	120	180
HONS	45	75	120	240	120	180
FONS	0	0	240	240	120	180

$$V = 24 \times C / (S \times t) \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$F = 1/2 \times \sum_{i=1}^n [(V_i + V_{i-1}) \times (T_i - T_{i-1})] \quad (2)$$

$$EF_{NH_3} = [\sum (NH_3)_F - \sum (NH_3)_0] / F_N \quad (3)$$

式中: V 为氨挥发速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]; C 为各处理氨挥发样品的铵态氮浓度 (mg/L); S 为密闭室覆盖面积 (m^2); t 为抽气时间 (h); 24 为时间换算系数; 10^{-2} 为体积换算系数。 F 为氨挥发累积损失量 (kg/hm^2); n 为施肥后总的测定次数; V_i 为第 i 次测定时的氨挥发速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]; V_{i-1} 为第 $i-1$ 次测定时的氨挥发速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]; T_i 为第 i 次测定时施肥后的天数, $T_i - T_{i-1}$ 为两个相邻测定日期之间的时间间隔 (天)。 EF_{NH_3} 为氨挥发损失系数 (%); $\sum (NH_3)_F$ 为单位面积内施氮处理的氨累积挥发量 (kg/hm^2); $\sum (NH_3)_0$ 为单位面积内未施氮处理的氨累积挥发量 (kg/hm^2); F_N 为总施氮量 (kg/hm^2)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2019 软件处理数据并作图, 并采用 SPSS 19.0 软件的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中的 Duncan 法检验处理之间的差异, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 作物产量和氮素偏生产力

2017—2019 年, 不施氮肥 (PK)、单施化肥 (NPK)、半量有机替代 (HONS) 及全量有机替代 (FONS) 等 4 个处理的春玉米平均产量差异显著 (图 2a)。氮肥施用显著提高作物产量, 与 PK 处理相比, NPK 处理春玉米产量提高 100.5%。等氮有机替代处理进一步提高了作物产量, 如 HONS 处理和 FONS 处理比 NPK 处理的玉米产量分别提高了 20.7% 和 30.9%。可见, 等氮有机替代能够有效提高作物产量, 且与半量有机替代相比, 全量有机替代对作物产量的提升能力更强。

不同施氮处理的氮素偏生产力在 35.6~46.7 kg/kg (图 2b), 其中 FONS 处理的氮素偏生产力最高, HONS 次之, NPK 最低。与 NPK 处理相比, HONS 处理和 FONS 处理的氮素偏生产力分别提高 20.8% 和 30.9%。可见, 等氮有机替代能够有效提高氮素偏生产力, 相比半量有机替代, 全量有机替代对氮素偏生产力的提升效果更强。

2.2 施肥后农田氨挥发特征

本研究中, NPK 和 HONS 处理的化肥分为基肥和追肥两次施用, HONS 和 FONS 处理的有机肥作

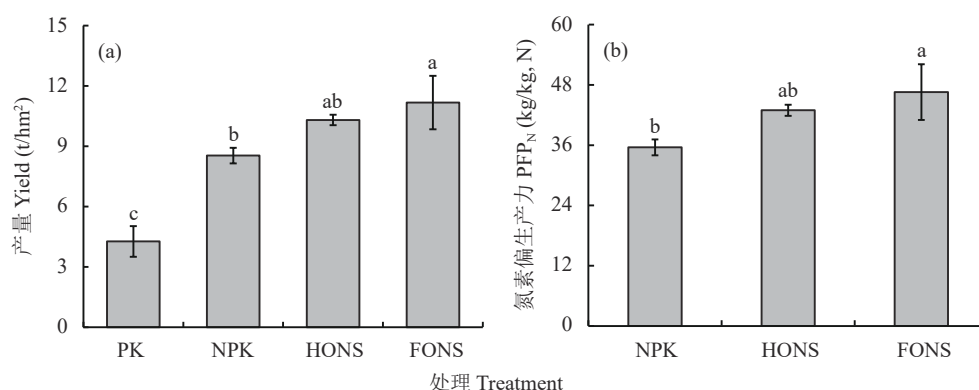


图2 玉米产量和氮素偏生产力

Fig. 2 Maize yield and partial factor productivity of applied N (PFP_N)[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)]Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$).]

为基肥一次性施用。因此, 根据化肥施用时期, 将农田氨挥发特征分为基肥期和追肥期进行分析 (图 3)。年际间和处理间的氨挥发规律基本一致, 都是在施肥后的第 2~4 天出现排放峰值, 之后氨挥发速率逐渐降低, 一般在 9 天内基本趋于稳定。施肥后的前 9 天氨挥发量占基肥期氨挥发总量的 70.1%, 占追肥期氨挥发总量的 63.7%。

各施肥处理基、追肥期间的氨挥发规律年际间变化显著 (图 3)。2017 和 2019 年基肥期的氨挥发速率低于追肥期, 可能是由于这两年的基肥期温度都要低于追肥期, 且追肥施肥量 (150 kg/hm^2) 高于基肥量 (90 kg/hm^2); 而 2018 年的氨挥发速率呈相反趋势, 可能是由于基肥期的温度高于追肥期温度。不同处理间农田氨挥发速率差异显著, 2017—2019 年间各处理氨挥发速率表现为 $\text{NPK} > \text{HONS} > \text{FONS} > \text{PK}$ 。不同处理的氨挥发年际特征也有明显差异, NPK 和 HONS 处理的氨挥发特征年际间存在显著差异, 但 FONS 的氨挥发特征年际间差异不明显。

对于 NPK 处理, 2017 和 2019 年的基肥期氨挥发速率都小于 $1 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 2017 年 NPK 处理基肥期的氨挥发速率峰值出现在施肥后的第 4 天, 为 $0.61 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 并在施肥后第 13 天出现一个小峰值 $0.13 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; 2019 年的基肥期氨挥发速率峰值出现在施肥后的第 2 天, 为 $0.56 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。2018 年的氨挥发强度较高, 基肥期氨挥发速率最高达 $2.07 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (施肥后第 3 天), 并在第 7 天出现一个小波峰 $0.60 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。在追肥期, NPK 处理 3 年的氨挥发速率峰值差异不大, 为 $1.10 \sim 1.84 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 且都出现在施肥后的第 2 或第 3 天, 这可能是由于相对于基肥期, 追肥期年际间的温度差异较小, 温度越高, 农

田中的氨挥发量越大^[16]。HONS 处理年际间的变化规律与 NPK 处理基本一致, 但氨挥发速率均小于 NPK 处理 (图 3)。在基肥期, 2017 和 2019 年的氨挥发峰值分别仅为 0.36 和 $0.23 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; 而 2018 年基肥期的氨挥发峰值则达到了 $1.39 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。在追肥期, 2017 年和 2019 年农田氨挥发速率峰值均出现在施肥后的第 2 天, 最高值分别为 1.13 和 $0.56 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; 2018 年的峰值则出现在施肥后的第 1 天, 氨挥发速率为 $0.92 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。FONS 处理氨挥发过程没有显著峰值, 一直都处于比较低的释放状态, 且年际间没有显著差异。这可能是由于有机肥中的氮主要是有机氮, 其矿化为氨的转化过程较慢, 不会造成氨挥发释放出现峰值^[10]。

2.3 农田氨挥发累积量和损失率

图 4 显示, 各处理年际间氨挥发损失量差异显著, NPK、HONS 以及 FONS 处理 3 年的氨挥发损失量变化范围分别为 $9.74 \sim 11.68 \text{ kg/hm}^2$ (平均 10.61 kg/hm^2)、 $4.76 \sim 9.10 \text{ kg/hm}^2$ (平均 7.06 kg/hm^2) 和 $3.01 \sim 6.17 \text{ kg/hm}^2$ (平均 4.38 kg/hm^2); 氨挥发系数分别为 $3.4\% \sim 4.2\%$ (平均 3.8%)、 $1.5\% \sim 3.1\%$ (平均 2.3%) 和 $0.8\% \sim 1.9\%$ (平均 1.2%)。有机替代处理农田氨挥发的年际间变化显著高于化肥。相比氨挥发损失较低的 2019 年, 2018 年 NPK 处理的氨挥发损失增加了 12.3% , 而 HONS 和 FONS 处理分别增加了 91.2% 和 105.0% , 相应的减排率, 也从 2019 年的 54.3% 和 71.1% 降到了 22.1% 和 47.2% 。NPK、HONS 以及 FONS 处理的氨挥发损失最高和最低之差, 分别为 1.94 、 4.34 和 3.16 kg/hm^2 。华北平原春玉米氨挥发损失主要来自追肥期, 从 2017—2019 年 3 年平均来看, NPK 处理追肥期平均氨挥发损失量占整个

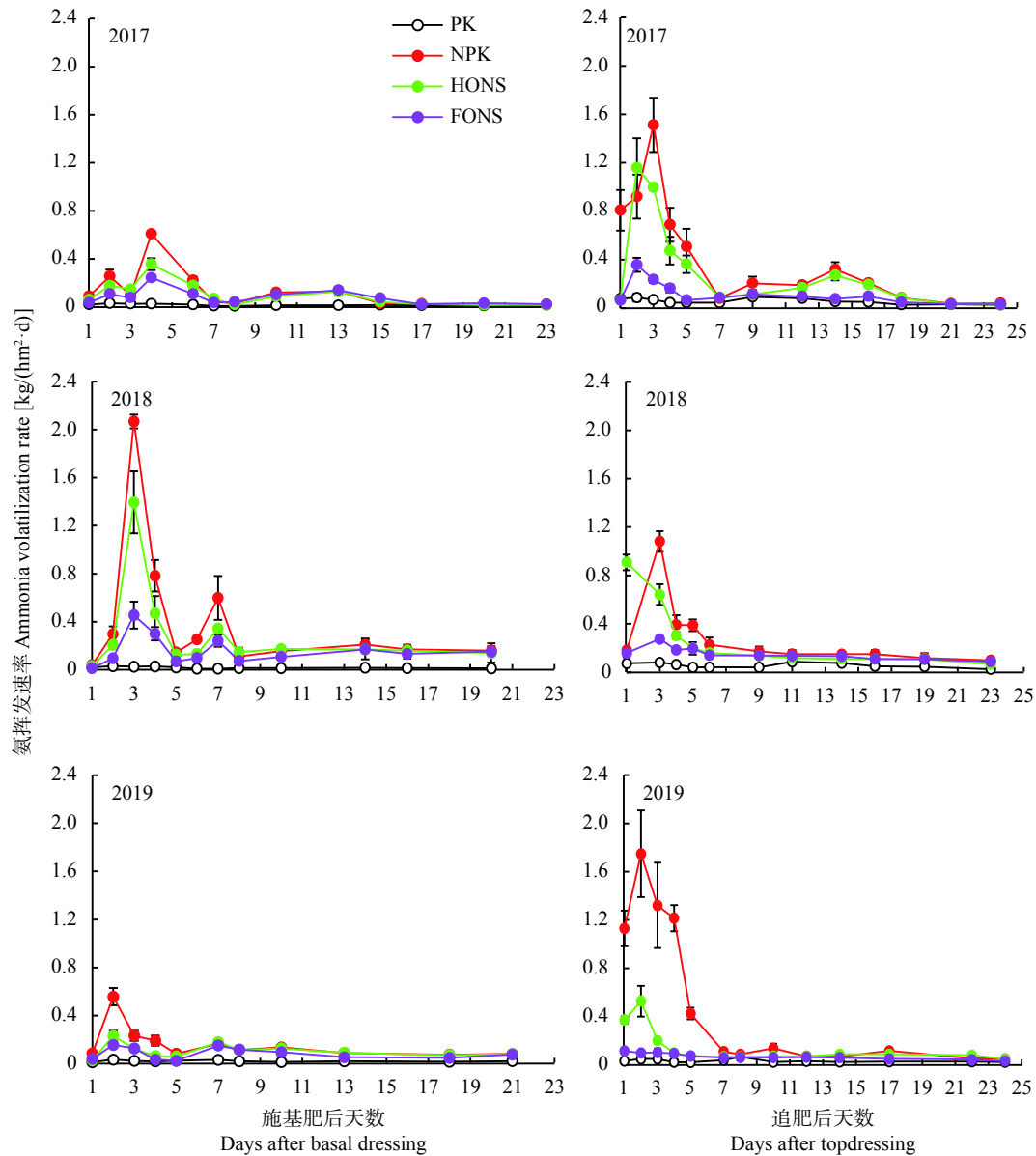


图3 施肥后农田氨挥发特征

Fig. 3 Characteristics of ammonia volatilization in farmland after fertilization

生育期的63.7%，HONS处理占58.6%，FONS处理占53.0%。但是年际间差异较大。2017—2019年的NPK、HONS以及FONS的追肥期氨挥发损失量占整个生育期的变化范围分别为46.3%~74.9%、48.0%~58.8%和51.2%~54.8%。尤其是2018年，基肥期温度显著高于其他年份（高3.2℃~4.0℃），故NPK和HONS处理的基肥期氨挥发损失占比较高，分别为53.7%和52.0%。

温度和降雨灌溉造成的土壤湿度不同，有机替代处理年际间氨挥发损失减排潜力差异显著（图4）。与NPK处理相比，2017—2019年HONS处理对氨挥发损失的减排率分别为24.9%、22.1%和54.3%，平

均为33.5%；FONS处理的减排率分别为59.3%、47.2%和71.1%，平均为58.7%。

2.4 气温、土壤湿度与氨挥发累积量的相关性分析

农田氨挥发影响因素的主成分分析结果（图5）表明，温度和土壤湿度是影响氨挥发累积量的两个主要因素，温度和湿度对氨挥发累积量影响的贡献率是49.4%，产量和降雨量对氨挥发累积量影响的贡献率为31.3%。

春玉米整个生育期内，氨挥发损失量与大气温度呈正相关关系（图6a-c）。在基肥期，随着大气温度的升高，氨挥发损失量显著增加。追肥期由于温

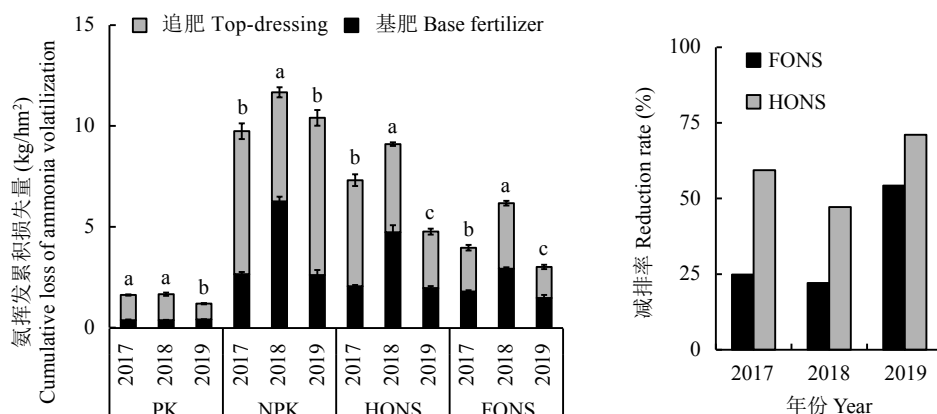


图 4 农田氨挥发累积损失量与损失率

Fig. 4 Cumulative loss and emission reduction rate of farmland ammonia volatilization

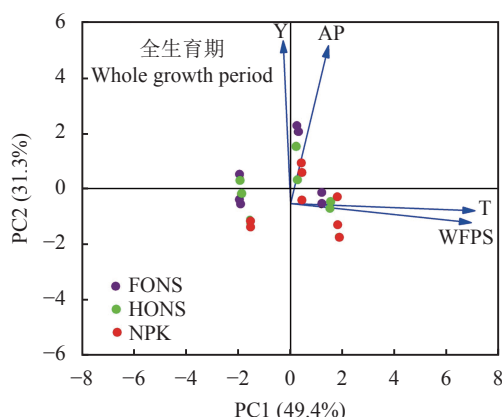
[注 (Note): 方柱上不同字母表示统一处理不同年份间差异显著 ($P<0.05$)Different letters above the bars indicate significant difference among different years for the same treatment ($P<0.05$).]

图 5 农田氨挥发影响因素主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of ammonia volatilization factors in farmland

[注 (Note): T—日均大气温度 Average daily atmospheric temperature; WFPS—土壤孔隙含水率 Water-filled pore space; Y—作物产量 Crop yield; AP—年平均降雨量 Average annual rainfall.]

度变化幅度较小 ($29.4^{\circ}\text{C}\sim 30.6^{\circ}\text{C}$), 且受作物冠层遮盖的影响, 温度对农田氨挥发的影响不显著。在春玉米的整个生育期内, 氨挥发累积量和土壤湿度呈正相关关系 (图 6d-f)。在基肥期, 随着土壤湿度的增加, 氨挥发累积量显著增加。追肥期由于受到作物冠层遮盖的影响, 土壤湿度对农田氨挥发累积量的影响不显著。

3 讨论

3.1 有机替代对作物产量的影响

本研究表明, 有机肥替代化肥能有效提高作物

产量, 这与大多数研究结果^[11,17-22]相一致。习斌等^[17]5 年田间试验结果表明, 有机肥 50% 替代化肥能够提高玉米产量 10.3%。郑凤霞等^[11]的 4 年田间试验结果表明, 在同等施氮量下, 化肥有机肥 1:1 配施可以提高冬小麦产量 6.8%。杨晓梅等^[20]和周慧等^[21]也得到了同样的结果, 50% 的有机肥替代化肥可以提高小麦产量 12.4% 和玉米产量 12.6%~17.0%。杜少平等^[23]和李喜喜等^[24]的田间试验结果表明, 全量有机替代化肥可提高西瓜产量 27.4%~31.6% 和水稻产量 7.8%。也有研究认为, 有机替代对作物产量的影响受替代比例的控制, 并指出有机肥替代比例为 75% 时处理效果最优^[25], 不仅可保证作物产量, 还能有效提高品质和氮磷肥利用率^[19]。但也有研究表明, 完全有机替代会降低作物产量^[2,10,20], 这与本研究得出的相比半量有机替代, 全量有机替代对作物产量的提升潜力更高的结论相反。导致结果有差异的原因可能与施肥措施的持续时间有关。因为有机肥养分释放速率较慢, 短期内难以像化肥处理那样可以在作物生长前期迅速增加土壤中速效氮含量, 为作物提供养分, 但随着时间的延长, 有机替代处理土壤肥力提升, 进而提升了作物产量^[2,26]。

3.2 有机替代对氨挥发的影响

本研究结果表明, 有机替代能够有效降低华北旱作农田氨挥发损失, 而且替代比例越高, 减排潜力越大, 这与已有研究结果^[9,24-25]基本一致。李喜喜等^[24]的大田试验结果表明, 猪粪和化肥配施处理较常规施肥处理能降低 4.21%~16.74% 的氨挥发。武星魁等^[9]的研究表明, 随着替代比例的增加, 氨挥发量逐渐降低, 包心菜季 75% 有机替代处理下氨挥发量

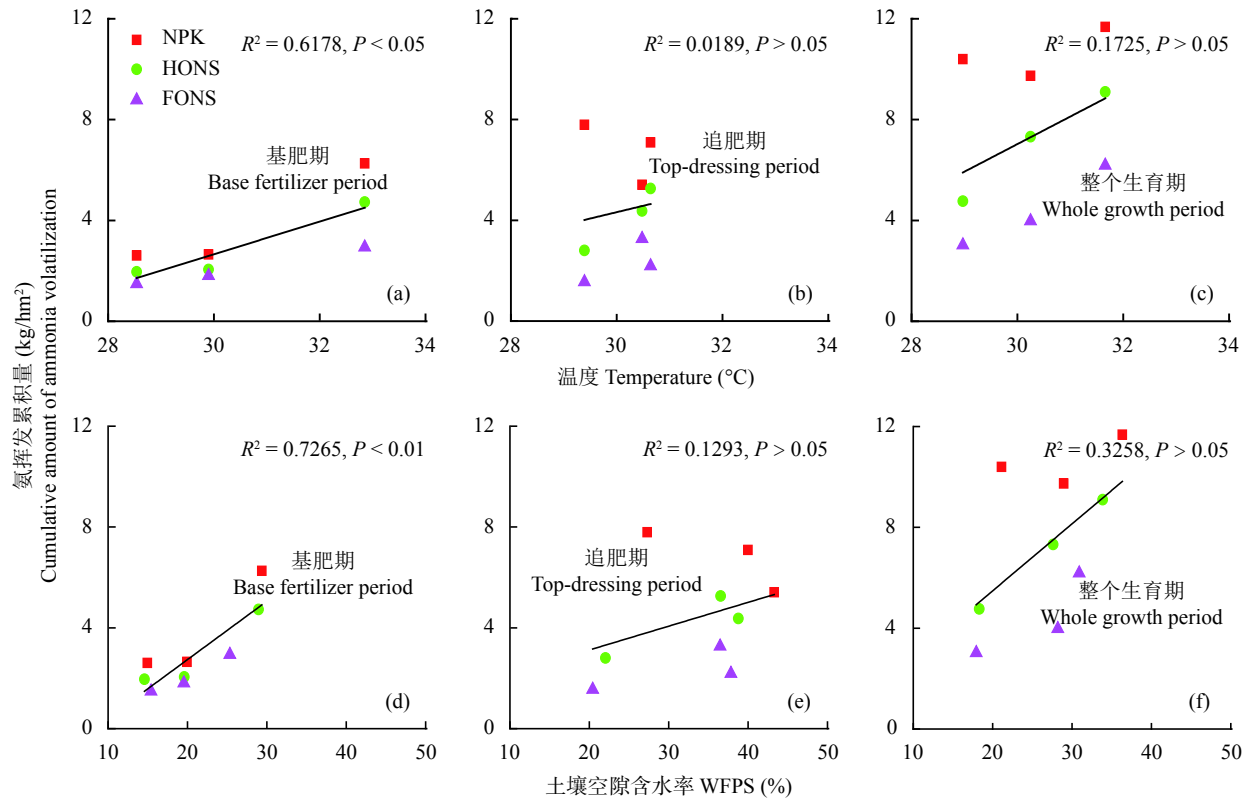


图6 气温、土壤湿度与氨挥发累积量的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of temperature, soil humidity and ammonia volatilization accumulation

最低, 为 25.8 kg/hm^2 , 比单施化肥处理降低 53.1%; 小青菜季 100% 有机替代处理下氨挥发量最低, 为 2.7 kg/hm^2 , 比单施化肥处理降低 87.8%。吕凤莲的冬小麦-夏玉米大田试验结果表明, 与单施化肥相比, 50%~100% 有机肥氮替代化肥氮能显著降低小麦/玉米轮作年总氨挥发量^[25]。究其原因可能是尿素和有机肥发生的反应不同。化学氮肥施入土壤后溶解较快, 在土壤脲酶的作用下, 尿素被水解成 NH_4HCO_3 , 随后迅速转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 一部分被土壤胶体吸附成为吸附态的 NH_4^+ , 另一部分则进入到土壤溶液中, 使 NH_4^+ 的浓度迅速提高, 为氨挥发提供了充足的底物; 而有机肥中大量的有机氮组分则需要经过长时间的矿化分解才能参与氨挥发的过程^[10], 而且有机质在分解过程中会释放大量有机酸, 并形成腐殖质, 抑制尿素水解过程中土壤酸碱度的升高, 从而显著抑制了土壤氨挥发^[27]。同时, 有机肥施用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, 最终实现有机替代的氨挥发减排^[11]。然而, 需要注意的是本研究施用的是干猪粪, 新鲜猪粪在晾干过程中, 氨挥发损失率可达 11.4%^[28]。因

此, 有机替代对氨挥发减排潜力的总体评估还应充分考虑猪粪在前期晾干过程中产生的氨挥发量。Zhou 等^[29]利用生命周期评价法综合分析表明, 不同有机肥替代化肥比例, 菜地氨挥发与单施化肥相比显著减少了 17.8%~22.2%。

3.3 年际变化对氨挥发的影响

农田施肥后氨挥发量主要受大气温度、气压、风速和降雨等多个气象因素的影响, 不同施肥期的主要影响因素也不同^[12]。本研究结果表明, 大气温度和土壤湿度是年际间各施肥处理基肥期氨挥发损失量变化的主要驱动因子。

温度对农田系统中氨挥发具有很大促进作用^[30-34]。在基肥期, 大气温度和氨挥发累积量呈显著正相关关系, 且 2017 和 2019 年基肥期温度低于追肥期温度, 氨挥发速率显著小于追肥期氨挥发速率; 而 2018 年基肥期温度高于追肥期温度, 则基肥期氨挥发速率高于追肥期, 表明温度是控制不同施肥期氨挥发的主要因素。温度通过影响土壤微生物和酶的活性, 控制 NH_4^+ 向 NH_3 的转化, 从而对氨挥发速率及累积量产生影响。温度升高会减弱土壤胶体对 NH_4^+ 的吸附能力, 使土壤溶液中 NH_4^+ 浓度上升, 促

进 NH_4^+ 向氨的转化, 使氨挥发速率增加^[33]。纪锐琳等^[35]的研究表明, 氮肥氨挥发量随着土壤含水量的上升而递增, 这与我们的研究结果相一致。土壤含水量对农田氨挥发的影响主要是影响肥料在土壤中的转化过程, 例如碳铵的溶解、尿素的水解、有机物的微生物分解等过程, 进而影响到农田氨的挥发^[16]。尿素在较高的土壤含水量下会与土壤充分接触, 使得尿素形态转化加快, 同时还会阻碍空气进入土壤, 抑制氨氧化过程的发生, 增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (液相) 所占氮素的形态比, 从而促进氨挥发^[36]。在水旱轮作种植体系中, 水稻氨挥发损失率显著高于旱地作物, 水稻期氮肥氨挥发损失率为 9.88%~19.29%, 小麦期氨挥发损失率为 5.92%~13.2%^[37]。然而也有研究认为, 施肥后及时浇水会通过水分稀释和淋洗作用降低表层挥发底物 NH_4^+ 的浓度^[38]。

本研究发现, 有机替代处理农田氨挥发的年际间变化显著高于化肥。其原因可能是高温高湿的气候条件会促进有机肥的矿化速率, 增强氨挥发损失^[39]。如, 2019 年施肥期的温湿度较低, NPK、HONS 和 FONS 处理的氨挥发损失量分别为 10.4、4.76 和 3.01 kg/hm^2 ; 而 2018 年施肥期的温湿度较高, NPK、HONS 和 FONS 处理的氨挥发损失量分别增加了 12.3%、91.2% 和 105.0%。HONS 和 FONS 处理对氨挥发损失的减排率分别从 54.3% 和 71.1%, 降低到 22.1% 和 47.2%。可见, 在氨挥发损失量较高的年份, 有机替代的减排潜力会被削弱, 因此在估算有机替代氨挥发减排潜力的时候应充分考虑气候条件带来的减排潜力变化。

4 结论

相比单施化肥, 有机肥替代化肥能够提高玉米产量; 相比半量有机替代, 长期全量有机替代对玉米产量的提升能力更强。华北地区春玉米农田氨挥发损失率为 3.8%, 有机肥替代化肥能够有效降低农田氨挥发损失量, 半量有机替代和全量有机替代的氨挥发损失量可降低 33.5% 和 58.7%。有机替代处理农田氨挥发的年际间变化显著高于化肥处理, 化肥处理的年际间变化幅度较小, 但是在氨挥发损失量较高的年份, 有机替代对氨挥发损失的减排潜力会被削弱。值得注意的是, 有机替代对氨挥发减排潜力的总体评估还应充分考虑猪粪在前期晾干过程中产生的氨挥发, 因此, 在施用有机肥之前, 还应充分考虑有机肥处理方式, 以降低施入农田前期的氨挥发。

参 考 文 献:

- [1] Bai Z, Winiwarter W, Klimont Z, *et al.* Further improvement of air quality in China needs clear ammonia mitigation target[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18): 10542–10544.
- [2] Zhang X, Fang Q, Zhang T, *et al.* Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2019, 26(2): 888–900.
- [3] Zhang N, Bai Z, Winiwarter W, *et al.* Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(20): 11840–11848.
- [4] Li T, Zhang Y, Wang J, *et al.* All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient $\text{PM}_{2.5}$ in China: A cohort study[J]. *The Lancet Public Health*, 2018, 3: e470–477.
- [5] An Z, Huang R, Zhang R, *et al.* Severe haze in northern China: A synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(18): 8657–8666.
- [6] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [7] 王桂良. 中国三大粮食作物农田活性氮损失与氮肥利用率的定量分析[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
Wang G L. Quantitative analysis of active nitrogen loss and nitrogen fertilizer utilization rate in three major grain crops in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.
- [8] Huang X, Song Y, Li M, *et al.* A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26: GB1030.
- [9] 武星魁, 姜振萃, 陆志新, 等. 有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 349–356.
Wu X K, Jiang Z C, Lu Z X, *et al.* Effect of partial replacement of fertilizer nitrogen by organic fertilizer on yield and environmental effect of leaf vegetables[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 349–356.
- [10] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1835–1846.
Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, *et al.* Effects of different organic fertilizer and chemical fertilizer on crop yield and nitrogen gas loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1835–1846.
- [11] 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.
Zheng F X, Dong S T, Liu P, *et al.* Effects of long-term organic and inorganic fertilizer application on grain yield and ammonia volatilization loss of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 567–577.
- [12] 周静, 崔键, 王国强, 等. 春秋两季红壤旱地氨挥发对氮施用量、气象

- 因子的响应[J]. *土壤学报*, 2007, (3): 499–507.
- Zhou J, Cui J, Wang G Q, *et al.* Response of ammonia volatilization to nitrogen application and meteorological factors in upland red soil in spring and autumn[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, (3): 499–507.
- [13] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 240–244.
- Song Y S, Fang X H. Research progress of ammonia volatilization in rice field[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 240–244.
- [14] Shang Q, Gao C, Yang X, *et al.* Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5): 715–725.
- [15] 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.
- San N, Zhao T K, Bi X Q, *et al.* Study on ammonia volatilization in wheat fields under different nitrogen application levels[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(9): 1858–1865.
- [16] 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 China Agricultural University*, 2019, 24(1): 149–162.
- [17] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326–335.
- Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizer on corn yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 326–335.
- [18] 强久次仁. 不同比例有机无机肥配施对冬小麦产量及氮效率的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2016.
- Qiang J C R. Effects of different proportion of organic and inorganic fertilizer on yield and nitrogen efficiency of winter wheat[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2016.
- [19] 刘沙沙, 李兵, 张古彬, 等. 猪粪有机肥替代化肥对黄淮地区油菜品质及养分利用的影响[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(8): 71–79.
- Liu S S, Li B, Zhang G B, *et al.* Effect of organic manure substitute chemical fertilizer on quality and nutrient utilization of lettuces in Huang-Huai area[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(8): 71–79.
- [20] 杨晓梅, 李桂花, 李贵春, 等. 有机无机肥施比例对华北褐土冬小麦产量与氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014, (4): 48–52.
- Yang X M, Li G H, Li G C, *et al.* Effect of organic and inorganic fertilizer proportion on yield and nitrogen utilization rate of winter wheat in cinnamon soil of north China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014, (4): 48–52.
- [21] 周慧, 史海滨, 徐昭, 等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7): 1649–1656.
- Zhou H, Shi H B, Xu Z, *et al.* Effects of fertilizer application on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2019, 38(7): 1649–1656.
- [22] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. *作物杂志*, 2019, (5): 89–96.
- Ma F F, Xing S L, Gan M Q, *et al.* Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019, (5): 89–96.
- [23] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1269–1277.
- Du S P, Ma Z M, Xue L. Effects of different organic fertilizers on yield, quality and nutrient uptake of watermelons in sandy fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1269–1277.
- [24] 李喜喜, 杨娟, 王昌全, 等. 猪粪施用对成都平原稻季氨挥发特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2236–2244.
- Li X X, Yang J, Wang C Q, *et al.* Effects of pig manure application on ammonia volatilization characteristics of rice season in Chengdu Plain[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(11): 2236–2244.
- [25] 吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2019.
- Lü F L. Agronomic and environmental effects of organic and inorganic fertilizer application in winter wheat/summer maize rotation system[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2019.
- [26] 王恒祥, 高树文. 不同有机肥氮替代化肥氮比例对水稻生产的影响[J]. *农业与技术*, 2018, 38(2): 3–4.
- Wang H X, Gao S W. Effect of different nitrogen ratio of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on rice production[J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(2): 3–4.
- [27] 孙雅杰, 吴文良, 刘原庆, 等. 有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(4): 37–46.
- Sun Y J, Wu W L, Liu Y Q, *et al.* Effects of organic fertilizer and chemical fertilizer on nitrogen utilization and loss in potted tomato[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(4): 37–46.
- [28] 张涛. 猪粪处置方式及施用年限对土壤氮通量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2018.
- Zhang T. Effects of pig manure disposal and application years on soil nitrogen flux[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [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] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2614–2622.
- Ni K, Ding W X, Cai Z C, *et al.* Study on the seasonal ammonia volatilization loss of wheat and its influencing factors in organic and inorganic fertilizer long-term location test[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(12): 2614–2622.
- [31] 马晓燕, 王军玲, 郭秀锐, 等. 不同施氮情景下北京地区露地甘蓝土壤氨的排放[J]. *北方园艺*, 2017, (13): 140–147.
- Ma X Y, Wang J L, Guo X R, *et al.* Ammonia emission from cabbage soil in Beijing under different nitrogen application conditions[J]. *Northern Horticulture*, 2017, (13): 140–147.

- [32] 李凡, 李江叶, 郝晋珉, 等. 华北平原长期施肥和耕作对土壤氨挥发的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1405–1414.
- Li F, Li J Y, Hao J M, *et al.* Effects of long-term fertilization and cultivation on ammonia volatilization in North China Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(6): 1405–1414.
- [33] 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.
- Wang F, Chen Y Z, Wu Z D, *et al.* Study on ammonia volatilization from acid tea garden soil and its influencing factors[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2016, 35(4): 808–816.
- [34] 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氨挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 199–203.
- Ge S F, Jiang Y M, Peng F T, *et al.* Effect of organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in apple orchard soil in spring[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 199–203.
- [35] 纪锐琳, 朱义年, 佟小微, 等. 竹炭包膜尿素在土壤中的氨挥发损失及其影响因素[J]. 桂林工学院学报, 2008, (1): 113–118.
- Ji R L, Zhu Y N, Tong X W, *et al.* Ammonia volatilization loss of bamboo charcoal coated urea in soil and its influencing factors[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2008, (1): 113–118.
- [36] 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, 30(11): 137–142.
- Yang X Y, Yang H D. Study on ammonia volatilization in northern summer maize fields under different fertilization conditions[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2016, 30(11): 137–142.
- [37] Dong Y, Wu Z, Zhang X, *et al.* Dynamic responses of ammonia volatilization to different rates of fresh and field-aged biochar in a rice-wheat rotation system[J]. [Field Crops Research](#), 2019, 241: 107568.
- [38] 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.* Study on ammonia volatilization rate and its control in farmland of North China Piedmont Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1115–1121.
- [39] 张惠. 黄河上游灌区稻田系统氮素气态损失及平衡研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2011.
- Zhang H. Study on gaseous nitrogen loss and its equilibrium in paddy field system in the upper reaches of Yellow River[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.