

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

李燕青^{1,2}, 温延臣³, 林治安³, 赵秉强^{2*}

(1 中国农业科学院果树研究所/农业部园艺作物种质资源利用重点实验室/辽宁省落叶果树矿质营养与肥料高效利用重点实验室, 辽宁兴城 125100; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 3 中国农业科学院德州盐碱土改良实验站, 山东德州 253015)

摘要:【目的】探讨本地区主要类型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, 为不同类型有机肥的科学施用提供理论依据。【方法】2014年10月—2015年9月在山东省中国农业科学院禹城试验基地进行了冬小麦—夏玉米田间小区试验, 供试小麦品种为‘济麦22’, 玉米品种为‘郑单958’。在常规施氮量(N 225 kg/季)基础上, 设化肥(CF)、鸡粪(CHM)、猪粪(PM)和牛粪(CM)单施以及化肥分别与3种有机肥配施处理(化肥氮分别占25%、50%、75%), 13个处理; 加倍施氮量下, 有机肥和化肥单施(DCF、DCHM、CPM、DCM)4个处理; 1个不施肥处理(CK), 共计18个处理。测定了小麦和玉米产量、N₂O排放通量和NH₃挥发通量。【结果】常规施氮量(N 225 kg/hm²)下, 单施鸡粪或猪粪的小麦、玉米产量与化肥相当, 单施牛粪比化肥处理减产。分别与CF、CHM、PM、CM相比, DCF、DCHM、DPM处理无增产效果, DCM处理玉米表现为增产。猪粪和鸡粪与化肥各配施比例处理的小麦、玉米产量间无显著差异, 且均与单施化肥处理相当; 牛粪与化肥配施处理的小麦产量随化肥配施比例的提高而提高, 玉米产量各配施比例处理间无显著差异。CF处理周年NH₃挥发量为39.63 kg/hm², 是单施有机肥处理的37~53倍; 单施化肥处理的NH₃排放系数接近9%左右, 单施有机肥处理的NH₃排放系数只有0.2%左右。有机肥与化肥配施的处理周年NH₃挥发总量随化肥配施比例增加而明显增加, 当化肥配施比例达到75%时, 周年NH₃挥发总量与单施化肥处理相当。CF处理的周年N₂O排放总量为2.85 kg/hm², 高于单施有机肥处理, 三种有机肥N₂O周年排放量由大到小依次为猪粪(2.51 kg/hm²)>鸡粪(1.91 kg/hm²)>牛粪(1.85 kg/hm²)处理; 加倍施用化肥和有机肥的N₂O排放量平均为常规施氮量的1.5倍以上。有机肥与化肥配施的处理周年N₂O排放总量随化肥配施比例增加而明显增加, 当化肥配施比例达到50%时, 周年N₂O排放总量达到或超过了单施化肥处理。CF处理N₂O排放系数为0.4%左右, 有机肥处理N₂O排放系数为0.3%左右。有机肥处理的NH₃挥发和N₂O排放主要发生在小麦季, 化肥处理主要发生在玉米季。加倍施肥均会明显增加NH₃挥发总量和N₂O排放总量, 但不影响二者的排放系数。【结论】不同粪肥与化肥配施对作物产量、田间N₂O排放和NH₃挥发的影响有明显差异。推荐施肥量下, 鸡粪或猪粪不配施或配施少量化肥(<50%), 牛粪配施75%左右的化肥可实现与化肥相当的作物产量, 同时减少农田氮肥气态损失。

关键词: 有机肥; 化肥; 冬小麦; 夏玉米; 作物产量; 氧化亚氮; 氨

Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland

LI Yan-qing^{1,2}, WEN Yan-chen³, LIN Zhi-an³, ZHAO Bing-qiang^{2*}

(1 Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Fruit Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture/Key Laboratory for Efficient Utilization of Deciduous Fruit Mineral Nutrition and Fertilizer, Liaoning Province, Xingcheng, Liaoning 125100, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3 Dezhou Experiment Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015, China)

收稿日期: 2018-12-07 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 辽宁省重点研发计划(2017301001); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP); 国家重点研发计划项目(2016YFD0201100)。

联系方式: 李燕青 E-mail: abcd7931@163.com; *通信作者 赵秉强 E-mail: zhaobingqiang@caas.cn

Abstract: [Objectives] The paper studied the yield and nitrogen loss caused by fertilization rate and combination proportions of manures with chemical fertilizer, to provide a theoretical basis for efficient use of different organic manures in the area. **[Methods]** A winter wheat/summer maize rotation field experiment was conducted in Yucheng Experimental Base of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shandong, from October 2014 to September 2015. The tested wheat cultivar was Jimai22 and maize cultivar was Zhengdan958. In the conventional nitrogen application rate of N 225 kg/(hm²·season), chemical fertilizer (CF), chicken manure (CHM), pig manure (PM) and cattle manure (CM) were applied in different chemical and manure N ratios (0%, 25%, 50%, 75%, 100%). In addition, single application of double N rate of fertilizers (DCF, DCHM, DPM and DCM) and no fertilizer control were included in the experiment. The crop yields, N₂O emission and NH₃ volatilization flux were determined. **[Results]** In the N rate of 225 kg/hm², the 100%CHM and 100%PM treatments had similar yields with 100%CF, but 100%CM treatment produced lower yields. Compared with their conventional N rate, DCF, DCHM and DPM had similar yields, while DCM increased maize yield significantly. The yields of wheat and maize in different proportion treatments of pig and chicken manure were all similar to those of 100%CF, and there was no significant difference among them. While among the combining treatments of cattle manure with chemical fertilizer, wheat yield decreased with the increasing ratios of cattle manure, and maize yields were less affected by the ratios. In N rate of 225 kg/hm², 100%CF treatment had an annual NH₃ volatilization of 39.63 kg/hm², which was 37–53 folds greater than those of 100% CHM, PM and CM treatments. The NH₃ discharge coefficient in 100%CF was approximately 9%, while those in the three 100% manure treatments was only 0.2%. The total annual NH₃ volatilization quantities of organic manure with chemical fertilizer were increased significantly with increase of chemical fertilizer ratio. When the chemical fertilizer accounted for 75%, the total annual NH₃ volatilization quantity was similar to that of 100%CF. Applying double N rate of CF, PM, CHM and CM all increased the annual NH₃ volatilization significantly. NH₃ volatilization occurred mainly during wheat season in manure treatments while mainly during maize season in CF treatments. The total annual N₂O emission for 100%CF was 2.85 kg/hm², higher than those of 100% manure treatments. The total annual N₂O emission of the manures were in the order of pig manure (2.51 kg/hm²)>chicken manure (1.91 kg/hm²)>cattle manure (1.85 kg/hm²). The average N₂O emission in the double N rate treatments was more than 1.5 times of those in conventional N rate. When the chemical fertilizer accounted for 50%, the total annual N₂O emission quantity was similar to or higher than those of 100%CF. The N₂O discharge coefficient for 100%CF was around 0.4%, while those for 100% manures were only about 0.3%. The NH₃ and N₂O emission was mainly occurred during wheat season in 100% manure treatments, whereas that was mainly during maize season in 100%CF. The NH₃ and N₂O emission quantities in double N rate treatments were significantly increased, but the discharge coefficients were kept the same. **[Conclusions]** Manure sources and nitrogen combining proportions with chemical fertilizer perform significantly different on crop yields, N₂O emission and NH₃ volatilization. Under the conventional N rate, chicken and pig manure could be applied alone or combined with a proportion of less than 50% of total N, while cow manure could be applied combined with more than 75% of chemical nitrogen, to achieve the similar crop yield as with chemical fertilizer alone, and reduce the gaseous loss of nitrogen fertilizer in farmland.

Key words: manure; chemical fertilizer; winter wheat; summer maize; crop yields; N₂O; NH₃

据估计,我国每年至少可产生 20 亿吨以上的畜禽粪便^[1]。大量的畜禽粪便经过简单处理后,作为肥料资源施入农田中,不仅解决了有机肥废弃物堆放产生的环境问题,同时可以替代部分化肥,缓解农田高度依赖化肥的问题^[2]。施肥作为农田耕作管理过程中重要的一环,对生态环境也会产生深刻的影

响。因此,了解有机废弃物在农田施用后对作物产量及环境的影响,是有机废弃物科学利用过程中亟需解决的问题。氮素的气态损失是农田氮肥损失的主要途径,气态氮损失途径主要包括氨挥发和氧化亚氮排放^[3-4]。温室效应的加剧,臭氧层的破坏和酸雨的形成都受到氨挥发和氧化亚氮排放的影响,主

要是氮肥引起的环境问题^[5-6]。研究表明, 氨挥发和氧化亚氮排放量均随施氮量的增加而增加, 且铵态氮肥处理的氧化亚氮的排放量显著高于硝态氮肥^[7-10]。等养分(氮)投入条件下, 化肥配施猪粪^[11]或牛粪^[12]的处理有较高作物产量, 但同时也产生了更多的氨挥发和氧化亚氮排放。Shan 等^[13]的研究则表明, 有机肥处理比化肥处理氨挥发增长了 11%~18%, 而有机无机复混肥处理比化肥处理氨挥发降低 10%。Tao 等^[14]的试验结果也表明, 施用 60% 的化肥配施一定量的牛粪或生物有机肥后, 氧化亚氮的排放量比全部施用化肥的处理减少 5%~10%。以往的研究^[15-18]多侧重于氮肥运筹以及农田管理方式对农田氨挥发、氧化亚氮排放动态规律及影响因子方面。有机无机配施对农田气态氮损失的研究往往仅涉及到单一种类的有机肥, 涉及有机无机不同配施比例的研究较少。本研究在华北地区冬小麦-夏玉米轮作种植制度下, 选择牛粪、鸡粪、猪粪三种常见有机肥种类, 通过其与化肥不同比例配施的田间小区试验, 分析不同类型粪肥与化肥配施后对作物产量与农田气态氮损失的影响, 为本地区主要类型有机肥的科学利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于山东省中国农业科学院禹城试验基地(116°34'E、36°50'N), 属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 13.4℃, >10℃ 积温 4440℃, 年降水量 569.6 mm, 蒸发量 2095 mm, 无霜期 206 d。试验地土壤类型为盐化潮土, 土壤质地为轻壤土, 成土母质为黄河冲积物。种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作制。试验开始前土壤表层养分含量见表 1。

1.2 试验设计

试验设置 1 个不施肥对照(CK)。常规施肥处理采用当地推荐养分量, 即: 每季作物(小麦或玉米)均为 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 75 kg/hm²。常规养分量下, 设 1 个 100% 化肥对照(CF), 化肥

与鸡粪、猪粪、牛粪分别配施, 其中化肥氮比例分别为(0%、25%、50%和75%)包括: 鸡粪 100%(CHM₁₀₀)、猪粪 100%(PM₁₀₀)、牛粪 100%(CM₁₀₀)、鸡粪 25%(CHM₂₅)、鸡粪 50%(CHM₅₀)、鸡粪 75%(CHM₇₅)、猪粪 25%(PM₂₅)、猪粪 50%(PM₅₀)、猪粪 75%(PM₇₅)、牛粪 25%(CM₂₅)、牛粪 50%(CM₅₀)、牛粪 75%(CM₇₅); 在常规养分量基础上, 设 4 个加倍施肥量单一肥料处理, 分别为加倍化肥(DCF)、加倍鸡粪(DCHM)、加倍猪粪(DPM)、加倍牛粪(DCM)。全部试验共 18 个处理, 随机区组设计, 重复 3 次。小区面积 29.7 m² (4.5 m × 6.6 m)。

供试作物品种: 小麦为‘济麦 22’, 玉米为‘郑单 958’。供试氮肥为尿素(N 46%), 磷肥为磷酸二铵(18-46-0), 钾肥为硫酸钾(K₂O 50%)。有机肥具体肥料用量根据所用粪肥风干样品中养分测定结果, 以全氮含量为标准折算, 经测定本试验 2014—2015 年度施用的三种有机肥具体养分含量及性质见表 2。

试验从 2014 年 10 月小麦季开始。化学氮肥以全年施肥总量计, 在冬小麦、夏玉米每季作物各 50%, 每季作物中无机氮肥 50% 做基肥, 50% 做追肥, 小麦在拔节期追施, 玉米在 8 叶期追施。将小麦和玉米两季所需有机肥、磷肥、钾肥在小麦播前撒施于地表, 旋耕, 然后开沟播种。2015 年 3 月下旬拔节期将小麦季追肥撒施于地表后灌水。6 月下旬小麦收获后, 开沟播种玉米, 将玉米基肥撒施后灌水。7 月下旬 8 叶期玉米追肥在雨后将肥料撒施于地表。常规有机肥与加倍有机肥处理不再施用磷钾肥。各处理各种肥料用量及施用时期见表 3。本试验期间当地部分气象数据见图 1。

1.3 样品采集及测定

小麦产量测定: 小区内共播种 14 行, 去除边行后选择有代表性的 1 整行, 脱粒、自然风干后称重, 根据小区面积换算为每公顷产量。

玉米产量测定: 小区内共播种 7 行, 去除边行后选择有代表性的 4 整行, 脱粒、自然风干后称重, 根据小区面积换算为公顷产量。

表 1 试验地基础土样养分含量

Table 1 Basic soil nutrients of the test soil

土层 (cm) Soil layer	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	速效钾 (mg/kg) Available K	pH
0—20	12.64	0.73	14.20	78.59	8.69
20—40	7.35	0.43	4.23	57.63	8.50

表 2 鸡粪、猪粪、牛粪养分含量

Table 2 Nutrient contents in manures of chicken, pig and cattle

有机肥 Manure	养分含量 Nutrient content (% , dry basis)				有机碳 Organic C (%)	C/N	含水量 Moisture (%)
	全氮 Total N	无机氮 Available N	全磷 Total P	全钾 Total K			
牛粪 Cattle manure	1.55	0.02	0.96	1.98	20.0	12.90	70.0
鸡粪 Chicken manure	1.73	0.04	2.65	2.40	16.1	9.31	30.0
猪粪 Pig manure	2.72	0.05	3.95	1.96	22.5	8.27	70.0

表 3 各处理养分用量 (kg/hm²)

Table 3 Details of nutrient input in each treatment

处理 Treatment	小麦季 Wheat season				玉米季 Maize season		
	基肥 Basal				追肥 Topdressing	基肥 Basal	追肥 Topdressing
	有机肥氮 Manure N	化肥 Chemical fertilizer			化肥 Chemical fertilizer		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	N	N	
CK	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	112.5	150.0	150.0	112.5	112.5	112.5
CHM ₁₀₀	450	0	0	0	0	0	0
PM ₁₀₀	450	0	0	0	0	0	0
CM ₁₀₀	450	0	0	0	0	0	0
CHM ₂₅	112	84.4	112.0	112.0	84.4	84.4	84.4
CHM ₅₀	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	56.2
CHM ₇₅	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	28.1
PM ₂₅	112	84.4	112.0	112.0	84.4	84.4	84.4
PM ₅₀	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	56.2
PM ₇₅	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	28.1
CM ₂₅	112	84.4	112.0	112.0	84.4	84.4	84.4
CM ₅₀	225	56.2	75.0	75.0	56.2	56.2	56.2
CM ₇₅	338	28.1	37.5	37.5	28.1	28.1	28.1
DCF	0	225.0	300.0	300.0	225.0	225.0	225.0
DCHM	900	0	0	0	0	0	0
DPM	900	0	0	0	0	0	0
DCM	900	0	0	0	0	0	0

注 (Note) : CM—牛粪 Cattle manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure; 处理中下标的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in subscripts of the treatment represent the percentage of manure N in the total N input.

N₂O 排放通量测定：采用静态箱—气相色谱法，采样装置见参考文献^[19]。

分别于 0、15、30、45 min 时用注射器从三通阀处抽取箱内 30 mL 气体样品，注入真空采气瓶中，同时记录箱体内温度，气体样品采用气相色谱仪进行分析。采样频率为：播种或施肥后连续观测一

周，之后每周一次；日平均气温低于 5℃ 时每两周采样一次；期间如有灌溉或降水 10 mm 以上，连续观测一周；具体采样频率视情况而定。每次采样时间固定在上午 9 点到 11 点，采样顺序按区组进行，以减少土壤呼吸的日变化影响。气体采集完毕后，将箱体搬走，以免影响作物生长。

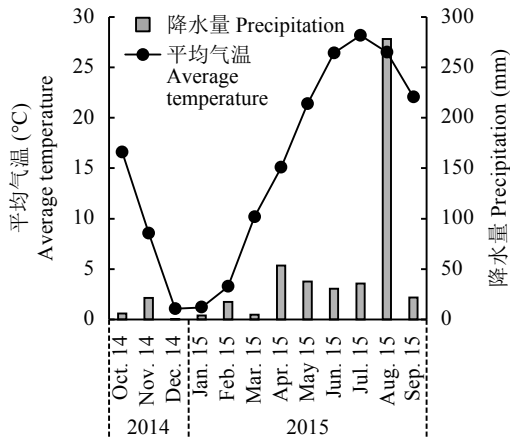


图1 禹城市 2014 年 10 月至 2015 年 9 月的月平均气温和降水量

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation in Yucheng City from October 2014 to September 2015

NH_3 挥发通量测定: 采用双层海绵通气法, 采样装置见参考文献^[20]。

取样时, 将海绵带回实验室, 用 250 mL 1 mol/L KCl 溶液震荡浸提 1 小时, 过滤后用 AA3 流动分析仪 (德国 Seal, AA3) 进行溶液中铵态氮的测定。采样频率为: 施肥后第 1 周每天连续监测, 第 2~3 周视测到的挥发 NH_3 数量多少, 每 1~3 天取样 1 次, 以后取样间隔至 7 天, 直至监测不到 NH_3 挥发时为止, 每次施肥后测定 15 次, 全年施肥 4 次, 共计测定 60 次。

1.4 数据处理及分析

N_2O 排放通量: $F = \rho \times V/A \times \Delta c/\Delta t \times 273/(273 + T)$ 。式中, F 为气体排放通量 [N_2O , $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; ρ 为标准状态下气体的浓度 ($1.96 \text{ kg}/\text{m}^3$); V 为采样箱体积 (m^3); A 为采样箱底面积 (m^2); Δc 为气体浓度差 (N_2O , $10^{-9} \text{ L}/\text{L}$); Δt 为采样时间间隔 (h); T 为采样温度 ($^\circ\text{C}$)。小麦季 N_2O 排放总量是从小麦基肥施入第一天至小麦收获当天时间段内每天 N_2O 排放通量总和。玉米 N_2O 排放总量是从小麦收获后第二天至下一季小麦基肥施入前一天时间段内每天 N_2O 排放通量总和。周年排放总量为两季排放总量相加。对于没有监测点的时间段 (N_2O 排放通量相对稳定期) 的排放通量是由相邻两个监测日期排放通量的均值乘以相应的天数取得。

NH_3 挥发通量: $\text{NH}_4^+-\text{N} [\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})] = M/(A \times D) \times 10^{-2}$ 。式中, M 为通气法单个装置平均每次测得的 NH_3 量 (NH_4^+-N , mg); A 为捕获装置的截面积 (m^2); D 为每次连续捕获的天数 (d)。小麦季 NH_3 挥发总量是小麦基肥施入后 21 天内与追肥施入后

14 天内监测到氨挥发总量的加和。玉米季 NH_3 挥发总量是玉米基肥施入后 14 天内与追肥施入后 14 天内监测到氨挥发总量的加和。周年挥发总量为两季挥发量的加和。

氮肥损失率 (%) 为挥发损失氧化亚氮或氨气中氮的含量占所施肥料中氮的百分比。

数据用 Excel 整理后进行方差分析, LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 作物产量

2.1.1 小麦产量 由表 4 可知, 施氮量为 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 单施猪粪、鸡粪处理的产量与化肥处理无显著差异; 单施牛粪处理的小麦籽粒产量仅为 $6398 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 显著低于单施鸡粪、猪粪、化肥的处理。施氮量为 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 单施猪粪、鸡粪处理的产量与化肥处理无显著差异; 单施牛粪处理的小麦籽粒产量最低, 与单施猪粪处理在 5% 水平上表现出了显著性差异, 但与单施鸡粪、化肥的处理间无显著性差异。与常规施氮量相比, 加倍施用化肥、猪粪、鸡粪均未显著提高小麦产量; 而加倍施用牛粪的小麦产量显著高于常规施用牛粪处理的产量。牛粪配施化肥的处理小麦产量随化肥配施比例的增加而增加, 化肥比例占到 75% 时 (CM_{25}) 小麦籽粒产量与单施化肥的处理达到了同一水平; 鸡粪、猪粪与化肥配施的处理小麦产量在不同配施比例之间的差异不显著, 与单施化肥的处理之间也没有显著性差异。不同有机肥之间, 有机肥比例高时 (CM_{75} 、 CM_{50}) 配施牛粪处理的小麦产量显著低于配施鸡粪和猪粪的处理; 配施牛粪比例低的处理 (CM_{25}) 产量与配施鸡粪、猪粪的处理之间差异不显著。配施鸡粪与猪粪的处理在不同有机无机配比之间无显著性差异。

2.1.2 玉米产量 由表 4 可知, 施氮量为 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 单施化肥处理的玉米产量最高; 单施鸡粪和猪粪处理的玉米产量与化肥处理无显著性差异; 单施牛粪处理玉米产量最低。施氮量为 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 单施猪粪、鸡粪处理的产量与单施化肥处理玉米产量接近, 三者玉米产量高出单施牛粪处理 $1000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 左右。与常规施氮量相比, 加倍施用化肥、猪粪、鸡粪均未显著提高玉米产量; 而加倍施用牛粪的玉米产量显著高于常规施用牛粪处理的产量。配施牛粪的处理中, 单施牛粪处理的玉米籽粒产量最低, 仅为 $6687 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 与不施肥处理没有显著性差异; 牛粪配施比例较大时 (CM_{75}) 籽粒产量

表 4 不同处理的作物产量 (kg/hm^2)
Table 4 Crop yields in different treatments

处理 Treatment	小麦产量 Wheat yield	玉米产量 Maize yield	总产量 Total yield
CK	3185.8 ± 528.0 f	5733.7 ± 850.6 d	8919.4 ± 1032.4 f
CF	8739.4 ± 442.87 ab	9300.2 ± 525.6 abc	18039.6 ± 745.9 abc
CM ₁₀₀	6398.2 ± 359.3 e	6687.9 ± 881.4 d	13086.1 ± 1181.4 e
CM ₇₅	7092.7 ± 95.4 de	8795.0 ± 1099.6 bc	15887.7 ± 1091.8 d
CM ₅₀	7502.0 ± 511.5 cd	9937.1 ± 552.4 ab	17439.1 ± 581.1 bcd
CM ₂₅	8477.8 ± 541.3 abc	9847.8 ± 1160.3 abc	18325.6 ± 1701.5 abc
CHM ₁₀₀	9024.6 ± 456.7 ab	8819.5 ± 482.0 bc	17844.1 ± 901.9 abcd
CHM ₇₅	9030.1 ± 546.8 ab	9512.9 ± 1020.3 abc	18543.0 ± 1565.8 abc
CHM ₅₀	9145.6 ± 339.8 ab	10307.2 ± 561.0 a	19452.7 ± 524.7 a
CHM ₂₅	9356.9 ± 620.8 a	9734.7 ± 1065.7 abc	19091.6 ± 1276.9 ab
PM ₁₀₀	9268.1 ± 1126.4 a	8587.5 ± 691.7 c	17855.6 ± 852.3 abc
PM ₇₅	9106.3 ± 163.3 ab	9164.9 ± 74.5 abc	18271.2 ± 202.5 abc
PM ₅₀	9286.2 ± 196.0 a	10110.2 ± 508.6 ab	19396.4 ± 647.3 ab
PM ₂₅	9099.2 ± 758.5 ab	9860.0 ± 287.3 abc	18959.2 ± 1018.5 ab
DCF	8521.8 ± 350.7 abc	9891.3 ± 766.1 abc	18413.0 ± 1016.8 abc
DCM	8031.5 ± 1379.8 bcd	8608.9 ± 1375.0 c	16640.5 ± 2745.2 cd
DCHM	9169.9 ± 386.2 ab	9861.4 ± 534.3 abc	19031.3 ± 585.6 ab
DPM	9660.9 ± 561.5 a	9694.3 ± 747.2 abc	19355.2 ± 1286.4 ab

注 (Note): CM—牛粪 Cattle manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure; 处理中下标的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in subscripts of the treatment represent the percentage of manure N in the total N input. 同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平差异显著 Values followed by different lower case letters mean significantly different at the 0.05 level.

较低, 小于单施化肥处理的玉米产量, 牛粪配比比例较小时 (CM₅₀、CM₂₅) 玉米产量较高, 超过了化肥处理的产量, 但配施的处理均与单施化肥处理的玉米产量无显著性差异。配施鸡粪处理中, 单施鸡粪的处理玉米产量略低于单施化肥处理, 鸡粪与化肥配施处理的产量略高于单施化肥的产量, 但均与单施化肥的处理无显著性差异。配施猪粪的处理中, 单施猪粪的处理玉米产量略低于单施化肥处理, 猪粪与化肥配施处理的产量略高于单施化肥的产量, 但均与单施化肥的处理无显著性差异。不同有机肥之间, 配施牛粪的处理与配施鸡粪、猪粪处理之间的玉米产量差异不显著, 化肥配施比例越高, 三种有机肥之间玉米产量差异越小。

2.2 周年氨挥发总量

表 5 中施氮量为 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 猪粪、鸡粪、牛粪处理年 NH_3 挥发总量分别为 1.79、1.30、0.98 kg/hm^2 , 三者之间并未表现出显著性差异。加倍化肥处理的年 NH_3 挥发总量达到 $85.69 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 是有机肥

处理的 47~87 倍。施氮量为 $225 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 猪粪、鸡粪、牛粪处理年 NH_3 挥发总量分别为 1.06、0.92、0.75 kg/hm^2 , 三者之间没有显著性差异。常量化肥处理的年 NH_3 挥发总量达到 $39.63 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 是有机肥处理的 37~53 倍。与常规施氮量相比, 加倍施用猪粪、鸡粪、牛粪 NH_3 挥发总量略有提高, 但并未表现出显著性差异。而加倍施用化肥的处理 NH_3 挥发总量显著高于常规化肥处理, 是常规化肥处理的 2.16 倍; 常规配施的处理中, 牛粪与化肥配施的三个处理, 鸡粪与化肥配施的三个处理, 猪粪与化肥配施的三个处理, 年 NH_3 挥发总量随化肥配施比例的增加而增加; 处理 CM₂₅、CHM₂₅、PM₂₅ 的年 NH_3 挥发总量与单施化肥处理的年 NH_3 挥发总量相当, 其余有机肥与化肥配施的处理年 NH_3 挥发总量均显著低于单施化肥的处理。

小麦季与玉米季相比, 由于本试验中一年的有机肥均在小麦播前施入, 单施有机肥的处理小麦季 NH_3 挥发量大于玉米季 NH_3 挥发量; 单施化肥的处

表 5 不同施肥处理的农田土壤 NH_3 挥发总量
Table 5 Total ammonia volatilization under different fertilizer treatments

处理 Treatment	小麦季 (kg/hm ²) Wheat season	玉米季 (kg/hm ²) Maize season	周年 (kg/hm ²) Annual	氮肥损失率 (%) N loss
CK	0.20 ± 0.01 j	0.13 ± 0.04 e	0.33 ± 0.05 e	
CF	2.89 ± 0.28 bc	36.74 ± 11.68 b	39.63 ± 11.93 b	8.81
CM ₁₀₀	0.49 ± 0.04 ij	0.26 ± 0.03 de	0.75 ± 0.06 e	0.17
CM ₇₅	2.09 ± 0.14 f	11.12 ± 6.27 cd	13.20 ± 6.40 c	2.93
CM ₅₀	2.34 ± 0.18 ef	17.63 ± 2.19 c	19.97 ± 2.25 c	4.44
CM ₂₅	2.32 ± 0.14 ef	33.84 ± 10.65 b	36.17 ± 10.79 b	8.04
CHM ₁₀₀	0.65 ± 0.03 i	0.27 ± 0.05 de	0.92 ± 0.07 de	0.20
CHM ₇₅	2.82 ± 0.28 cd	6.86 ± 1.27 cde	9.68 ± 1.55 cde	2.15
CHM ₅₀	2.98 ± 0.27 bc	17.45 ± 3.59 c	20.42 ± 3.86 c	4.54
CHM ₂₅	3.23 ± 0.26 b	31.24 ± 3.58 b	34.47 ± 3.80 b	7.66
PM ₁₀₀	0.82 ± 0.08 hi	0.24 ± 0.05 de	1.06 ± 0.11 de	0.24
PM ₇₅	2.33 ± 0.20 ef	9.65 ± 0.68 cde	11.98 ± 0.87 cd	2.66
PM ₅₀	2.47 ± 0.20 de	17.29 ± 2.99 c	19.77 ± 3.18 c	4.39
PM ₂₅	2.62 ± 0.14 cde	37.36 ± 14.42 b	39.97 ± 14.54 b	8.88
DCF	6.28 ± 0.53 a	79.41 ± 15.58 a	85.69 ± 15.76 a	9.52
DCM	0.77 ± 0.07 hi	0.21 ± 0.02 de	0.98 ± 0.09 de	0.11
DCHM	1.09 ± 0.12 h	0.21 ± 0.04 de	1.30 ± 0.15 de	0.14
DPM	1.62 ± 0.07 g	0.17 ± 0.01 e	1.79 ± 0.07 de	0.20

注 (Note): CM—牛粪 Cattle manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure; 处理中下标的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in subscripts of the treatment represent the percentage of manure N in the total N input. 同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平下差异显著 Values followed by different lower case letters mean significantly different at the 0.05 level.

理以及有机无机配施的处理均是玉米季 NH_3 挥发量大于小麦季 NH_3 挥发量, 且玉米季 NH_3 挥发量是小麦季 NH_3 挥发量的 4~13 倍左右。从周年四个施肥时期内土壤 NH_3 挥发总量中的氮损失占所施氮肥用量的百分比可以看出, 单施化肥的处理 NH_3 挥发损失氮占 9% 左右, 单施有机肥处理的 NH_3 挥发损失氮仅占所施氮肥用量的 0.2% 左右, 远小于化肥处理。配施的处理中 NH_3 挥发损失百分比随化肥配施比例的增加明显增加。

2.3 周年氧化亚氮排放总量

表 6 是各处理 N_2O 周年排放总量。施氮量为 450 kg/hm² 时, 单施化肥的 N_2O 周年排放总量为 4.06 kg/hm², 单施猪粪的处理 N_2O 排放量高于此值, 而加倍牛粪与加倍鸡粪处理的周年 N_2O 排放量分别为 3.06、3.23 kg/hm², 显著小于加倍化肥处理。施氮量为 225 kg/hm² 时, 单施化肥的处理 N_2O 周年排放总量为 2.85 kg/hm², 显著高于单施牛粪、鸡

粪、猪粪的处理; 三种有机肥之间, 单施猪粪处理的 N_2O 排放量为 2.51 kg/hm², 显著高于单施牛粪 (1.85 kg/hm²) 和单施鸡粪 (1.91 kg/hm²) 处理。与常规施氮量相比, 加倍施用化肥、牛粪、鸡粪、猪粪均显著增加了农田 N_2O 的排放量, 平均为常规施氮量的 1.5 倍以上。有机肥与化肥配施的处理中, 牛粪与化肥配施的三个处理随着化肥比例的增加 N_2O 排放量逐渐增加, 其中处理 CM₅₀ 和 CM₂₅ 的 N_2O 排放量分别达到了 3.06 和 3.15 kg/hm², 略高于单施化肥的处理, 但未表现出显著性差异; 鸡粪与化肥配施的处理中以 CHM₅₀ 的 N_2O 排放量最高, 达到了 3.51 kg/hm², 处理 CHM₂₅ 的 N_2O 排放量略高于单施化肥的处理, 但未表现出显著性差异; 猪粪与化肥配施的处理中以 PM₅₀ 的 N_2O 排放量最高, 达到了 4.17 kg/hm², 处理 PM₂₅ 的 N_2O 排放量显著高于单施化肥的处理, 而处理 PM₇₅ 的 N_2O 排放量与单施化肥的处理没有表现出显著性差异。

表 6 各处理的 N₂O 排放总量Table 6 Total N₂O emission under different fertilizer treatments

处理 Treatment	小麦季 (kg/hm ²) Wheat season	玉米季 (kg/hm ²) Maize season	周年 (kg/hm ²) Annual	氮损失率 (%) N loss (%)
CK	0.44 ± 0.12 j	0.22 ± 0.01 h	0.69 ± 0.09 h	—
CF	0.76 ± 0.03 i	2.09 ± 0.32 b	2.85 ± 0.35 e	0.40
CM ₁₀₀	1.54 ± 0.05 f	0.32 ± 0.01 gh	1.85 ± 0.05 g	0.26
CM ₇₅	0.99 ± 0.00 h	0.87 ± 0.13 e	1.86 ± 0.13 g	0.26
CM ₅₀	1.81 ± 0.14 e	1.25 ± 0.16 cd	3.06 ± 0.30 de	0.44
CM ₂₅	0.95 ± 0.02 h	2.20 ± 0.11 b	3.15 ± 0.13 de	0.45
CHM ₁₀₀	1.63 ± 0.04 f	0.32 ± 0.01 gh	1.91 ± 0.11 g	0.27
CHM ₇₅	1.27 ± 0.12 g	0.82 ± 0.16 ef	2.09 ± 0.28 g	0.29
CHM ₅₀	2.07 ± 0.13 d	1.44 ± 0.17c	3.51 ± 0.30 c	0.50
CHM ₂₅	1.04 ± 0.07 h	2.06 ± 0.31 b	3.10 ± 0.24 de	0.44
PM ₁₀₀	2.14 ± 0.13 d	0.33 ± 0.05 gh	2.51 ± 0.13 f	0.36
PM ₇₅	1.86 ± 0.09 e	1.05 ± 0.09 de	2.91 ± 0.19 de	0.42
PM ₅₀	2.93 ± 0.13 b	1.23 ± 0.14 cd	4.17 ± 0.27 ab	0.60
PM ₂₅	1.51 ± 0.02 f	1.99 ± 0.03 b	3.50 ± 0.02 c	0.50
DCF	1.23 ± 0.15 g	2.83 ± 0.30 a	4.06 ± 0.15 b	0.29
DCM	2.60 ± 0.05 c	0.50 ± 0.10 gh	3.06 ± 0.12 de	0.22
DCHM	2.66 ± 0.04 c	0.57 ± 0.01 fg	3.23 ± 0.03 cd	0.23
DPM	3.96 ± 0.06 a	0.44 ± 0.06 gh	4.40 ± 0.11 a	0.31

注 (Note): CM—牛粪 Cattle manure; CHM—鸡粪 Chicken manure; PM—猪粪 Pig manure; 处理中下标的数字代表有机肥氮在全部氮投入中的比例 The values in subscripts of the treatment represent the percentage of manure N in the total N input. 同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平下差异显著 Values followed by different lower case letters mean significantly different at the 0.05 level.

小麦季与玉米季相比, 单施化肥的处理玉米季 N₂O 排放量明显高于小麦季; 而单施有机肥的处理, 由于本试验全年有机肥在小麦播前施入, 导致小麦季的 N₂O 排放量明显高于玉米季; 配施的处理中, 化肥配施比例高的处理 (CM₂₅、CHM₂₅、PM₂₅) 玉米季有较高的 N₂O 排放量。从周年内土壤 N₂O 排放损失氮占所施氮肥用量的百分比可以看出, 单施牛粪、鸡粪、猪粪处理的氮损失率分别为 0.26%、0.27% 和 0.36%, 均低于单施化肥处理氮的损失率 (0.4%), 配施处理中化肥配施比例高的处理 (CM₅₀、CM₂₅、CHM₅₀、CHM₂₅、PM₅₀、PM₂₅) 氮的损失率均高于单施化肥处理的。

3 讨论

3.1 不同类型有机肥与化肥配施对作物产量的影响

化肥和有机肥对作物增产都具有很关键的作

用, 两者的增产效果几乎不相上下^[21]。国内外很多长期定位试验表明, 试验早期单施化肥处理的作物产量高于单施有机肥的处理, 但试验后期单施有机肥处理的产量会达到或超过单施化肥处理的产量水平^[22-23]。化肥和有机肥对作物产量产生不同影响的直接原因是两者所提供养分的植物有效性不同。化肥提供的养分几乎全部为矿质养分, 可以被植物直接吸收利用; 而有机肥所提供的可被作物直接吸收利用的矿质养分仅占很小一部分, 绝大部分养分需要随着有机肥的矿质化过程缓慢的释放出来。不同类型的有机肥由于有机肥本身的矿质养分含量不同, 在土壤中矿化分解快慢也不同, 因此对作物产量的影响也不尽相同。

本研究发现, 施肥量为 450 kg/hm² 时, 三种有机肥处理的小麦、玉米作物产量未与化肥处理表现出显著性差异 ($P < 0.05$), 但牛粪处理的小麦、玉米产量明显偏低。施氮量为 225 kg/hm² 时, 牛粪处理

的小麦和玉米产量均显著低于施用化肥处理的产量, 尤其是玉米季单施牛粪处理的玉米产量与不施肥处理的产量接近; 而施用鸡粪、猪粪处理的小麦季产量与化肥处理没有显著性差异, 且产量值相差不多, 玉米季施用鸡粪、猪粪处理的玉米产量与化肥虽然没有表现出显著性差异, 但产量均低于施用化肥处理。这主要是由于本文中根据施肥习惯将全年的有机肥在小麦播前一次性施入, 而化肥是每季作物分两次施入, 单施牛粪、鸡粪、猪粪处理的施氮量在小麦季是单施化肥处理的 2 倍, 玉米季单施有机肥的处理只利用小麦季残留的氮素。高施氮量时, 玉米季猪粪和鸡粪处理仍可提供足够的养分供玉米吸收利用, 因此并未与化肥处理表现出显著性差异。由表 4 可以看出, 施用鸡粪和猪粪处理在 450 kg/hm² 和 225 kg/hm² 两个施氮水平下, 周年作物产量均可实现等施氮量条件下化肥处理的作物产量, 而牛粪由于矿化分解慢, 氮素有效性低, 高施氮量时勉强可以达到化肥处理的产量, 常规施氮量时产量显著低于等施氮量的化肥处理。配施的处理中, 鸡粪、猪粪分别与化肥配施的三个处理之间小麦产量和玉米产量均未表现出显著性差异, 并且和单施化肥处理的产量相当。主要是由于猪粪和鸡粪的矿化分解较快, 在作物生长季节释放出可供作物吸收利用的氮素补充了少施用的无机氮肥。而牛粪与化肥配施的处理, 由于释放的氮素不足以补充少施用的无机氮肥, 因此随着有机肥比例的提高作物产量略有下降。

研究表明, 有机无机配施保证粮食产量方面的原因可以概括为三个方面, 第一是有机肥的培肥作用(土壤理化性质的改良), 第二是有机肥中额外的磷、钾及中微量元素, 第三是由于微生物的活动调节了氮的供应, 使其更符合作物的需求规律^[24-27]。本文中冬小麦-夏玉米周年轮作过程中, 等施氮量条件下并未发现有机无机配施处理的小麦玉米总产量(表 4)显著高于施用化肥的处理, 主要原因可能为: 1) 有机肥的培肥作用在试验开始阶段并不明显; 2) 本试验中化肥处理补充了足够的磷钾元素, 试验开始阶段土壤中的中微量元素也不是限制作物产量的因素; 3) 本试验中化肥的使用是周年分 4 次施用, 人工对氮素的调节作用也基本适合了作物的需求规律。

3.2 不同类型有机肥与化肥配施对农田氮肥气态损失的影响

农田氨挥发是氮肥损失重要途径之一^[28-29]。土壤氨挥发产生的过程可以描述为, 土壤胶体吸附的铵

离子转化为土壤溶液中的游离态, 进而转化为氨, 然后通过土壤大气交换过程挥发到空气中^[30]。在影响农田氨挥发的众多因素中, 氮肥的类型及施用方式对农田氨挥发有举足轻重的影响。一般来讲, 化学氮肥施入土壤后溶解较快, 一部分被土壤胶体吸附成为吸附态的铵离子, 另一部分则进入到土壤溶液中, 使铵离子的浓度迅速提高, 促进氨挥发进程。有机肥料施入土壤后, 所含有的少量速效氮进入土壤后的行为基本与化学氮肥一致, 也可以小幅度地提高土壤溶液中铵离子的浓度; 而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。本研究中, 加倍化肥处理的年氨挥发总量为 85.69 kg/hm², 是常规施氮量处理的 2.16 倍, 但二者氨挥发损失占施氮量的百分比接近, 这与前人研究结果基本一致^[31-32]。一般而言, 有机肥中速效氮的含量极低。本研究中所用三种有机肥, 速效氮仅占全氮的 1%~2% (此值为风干样品的测定值, 新鲜样品中速效氮可占到全氮的 10% 左右), 在等氮量(全氮 225 kg/hm²) 条件下, 单施化肥处理是单施有机肥处理的 37~53 倍。施用有机肥产生的氨挥发累积量的大小取决于两个方面, 一是施用前有机肥自身速效氮含量, 二是一定时间内有机氮矿化分解能力(产生速效氮的速度)。试验中采用的三种有机肥速效氮占全氮的百分比相差很小(1%~2% 之间), 研究表明三种粪肥矿化分解速率有显著差异^[2, 33], 但在三个单施有机肥处理的氨挥发累积量并没有表现出显著性差异, 可能是由于有机肥矿化分解的氮及时被作物吸收或者转化为其它的氮形态, 没有以氨的形式挥发到空气中。不同施肥时期氨挥发通量表现出明显不同的规律与肥料类型、施肥方式及气象条件有密不可分的联系^[34]。本试验中全年的有机肥在小麦基肥时期一次性施入, 化肥全年分 4 次投入, 因此单施有机肥的处理在玉米季的两次施肥时期没有监测到明显的氨挥发。

硝化和反硝化是农田产生氧化亚氮的两条重要途径。土壤中氧化亚氮的产生过程受反应底物碳、氮的双重影响, 底物碳充足时, 氧化亚氮的排放主要受氮供应水平的制约; 底物氮充足时, 氧化亚氮的排放主要受碳供应水平的制约^[35-36]。化学氮肥, 速效氮充足, 可以迅速提高氧化亚氮产生过程的底物氮; 有机氮肥速效氮含量低, 在提供底物 N 方面不及化学氮肥, 但可以提供额外的底物碳; 不同种类的有机肥由于矿化分解过程不同, 提供碳、氮的效率不同, 也会导致氧化亚氮产生过程不同。试验发

现, 常规施氮量条件下, 单施牛粪、鸡粪、猪粪氧化亚氮周年排放量均显著小于单施化肥的处理, 表明本试验条件下氧化亚氮的排放主要受氮供应水平的制约。加倍施肥条件下, 猪粪处理的氧化亚氮周年排放量超过了加倍化肥的处理, 主要是本试验中猪粪在加倍施用条件下可以提供足够多的底物氮, 同时底物碳也更充足, 促进了氧化亚氮的排放。常量配施的处理中以 50 : 50 处理的氧化亚氮排放量较高, CHM₅₀、PM₅₀ 的氧化亚氮排放量显著超过了其它配施比例的处理, 表明此配施比例条件下更有利于微生物活动, 促进氧化亚氮的排放。

3.3 不同类型有机肥科学利用方式

本文中小麦季猪粪、鸡粪与化肥的配施处理和鸡粪、猪粪单施处理基本上都达到了单施化肥处理的产量, 玉米季单施猪粪、鸡粪处理的产量略低于化肥处理; 小麦季处理 CM₂₅ 和单施化肥处理的产量相当, 而玉米季由于气候条件更利于有机肥分解, 处理 CM₅₀ 和 CM₂₅ 均达到了和单施化肥处理相当的产量。理想的施肥制度是在获得较高作物产量的同时减少环境的负面影响。试验中三种常见有机肥与化肥配施, 产量具有优势的处理, 同时也产生了更多的氨挥发和氧化亚氮, 这与前人研究结果基本一致^[11-12]。但是, 本研究结果也显示, 在等氮量条件下, 随化肥施用比例的增加氮肥的气态损失是明显增加的。因此, 保证作物产量的前提下增加有机肥施用比例可在一定程度上减少氮肥的气态损失, 降低施肥对环境造成的负面影响。因此本地区施氮量为每季作物 225 kg/hm² 时, 猪粪或鸡粪的施用方式是配施少量化肥 (25% 化肥 + 75% 有机肥), 或者小麦季有机肥单施, 玉米季追施少量氮肥; 牛粪小麦季应多配施化肥 (75% 化肥 + 25% 有机肥), 玉米季化肥用量可酌情降低。另外, 本试验结果为第一年数据, 随着试验年限的延长, 有机肥施用比例或可逐渐增加。

4 结论

1) 常规施氮量条件下, 鸡粪、猪粪单施与单施化肥对小麦玉米有相同的增产效果; 牛粪单施增产效果不及单施化肥处理; 三种有机肥单施产生的氮肥气态损失均明显低于化肥单施处理, 且有机肥处理的氮肥气态损失主要发生在小麦季, 化肥处理的氮肥气态损失主要发生在玉米季。

2) 加倍施用化肥、鸡粪、猪粪对小麦和玉米没

有显著的增产效果, 但农田氮肥气态损失显著增加; 加倍施用牛粪时增产效果显著, 农田氮肥气态损失也显著增加。

3) 鸡粪、猪粪与化肥配施比例对小麦玉米产量影响不显著; 牛粪与化肥配施时随化肥比例增加, 小麦玉米产量逐渐增加。氮肥气态损失随化肥施用比例增加逐渐增加。

4) 推荐施肥量下, 鸡粪或猪粪第一年不配施或配施少量化肥 (< 50%), 牛粪第一年配施 75% 左右的氮肥可实现与化肥相当的作物产量, 同时减少农田氮肥气态损失。

参 考 文 献:

- [1] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171-179.
Geng W, Hu L, Cui J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 171-179.
- [2] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2016.
Li Y Q. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer [D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [3] 武岩, 红梅, 林立龙, 等. 不同施肥措施对河套灌区盐化潮土氮挥发及氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤, 2017, 49(4): 745-752.
Wu Y, Hong M, Lin L L, et al. Influence of different fertilization measures on NH₃ volatilization and N₂O emission in salined fluvo-aquic soil of Hetao irrigation area[J]. Soils, 2017, 49(4): 745-752.
- [4] 张文, 周广威, 闵伟, 等. 应用¹⁵N示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向[J]. 土壤学报, 2015, (2): 372-380.
Zhang W, Zhou G W, Min W, et al. Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using ¹⁵N tracing method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, (2): 372-380.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 55-58
- [6] Linquist B, van Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194-209.
- [7] Yu Q G, Ye J, Yang S N, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization[J]. *Rice Science*, 2013, 20(2): 139-147.
- [8] Wang G, Chen X, Cui Z, et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 293-300.
- [9] Han K, Zhou C J, Wang L Q. Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation system[J]. *Journal of Integrative*

- Agriculture*, 2014, 13(5): 1099–1112.
- [10] Volpi I, Laville P, Bonari E, *et al.* Improving the management of mineral fertilizers for nitrous oxide mitigation: The effect of nitrogen fertilizer type, urease and nitrification inhibitors in two different textured soils[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 181–188.
- [11] Huang J, Duan Y H, Xu M G, *et al.* Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(9): 2082–2092.
- [12] 肖娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氮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.
- Xiao J, Fan J L, Ye G P, *et al.* Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 2011–2018.
- [13] Shan L, He Y, Chen J, *et al.* Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 38: 14–23.
- [14] Tao R, Wakelin S A, Liang Y, *et al.* Nitrous oxide emission and denitrifier communities in drip-irrigated calcareous soil as affected by chemical and organic fertilizers[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 612: 739–749.
- [15] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氮挥发规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1858–1865.
- Shan N, Zhao T K, Bi X Q, *et al.* Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1858–1865.
- [16] 李祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同水氮运筹模式对田间土壤氮挥发及春玉米籽粒产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4): 799–807.
- Li Z, Shi H B, Li X Y, *et al.* Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water-nitrogen management regimes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 799–807.
- [17] 薛建福, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 1–9.
- Xue J F, Pu C, Zhang R, *et al.* Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 1–9.
- [18] 柳文丽, 李锡鹏, 沈茜, 等. 施肥方式对冬小麦季紫色土 N₂O 排放特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9): 1029–1037.
- Liu W L, Li X P, Shen Q, *et al.* Effects of fertilizer application regimes on soil N₂O emissions in the croplands of purple soil in the Sichuan Basin during wheat season[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1029–1037.
- [19] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381–4389.
- Li Y Q, Tang J W, Che S G, *et al.* Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the north China plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381–4389.
- [20] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 205–209.
- Wang Z H, Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205–209.
- [21] 沈善敏. 国外的长期肥料试验 (一)[J]. *土壤通报*, 1984, 15(2): 85–91.
- Shen S M. Foreign long-term fertilizer experiment (1)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984, 15(2): 85–91.
- [22] 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.
- Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, *et al.* Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809–2819.
- [23] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 106–112.
- Liu S L, Tong C L, Wu J S, *et al.* Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 106–112.
- [24] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 532–542.
- Meng L, Zhang X L, Jiang X F, *et al.* Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532–542.
- [25] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543–551.
- Zhang G R, Li J M, Xu M G, *et al.* Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 543–551.
- [26] 张娟, 沈其荣, 冉炜, 等. 施用预处理秸秆对土壤供氮特征及菠菜产量和品质的影响[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 37–42.
- Zhang J, Shen Q R, Ran W, *et al.* Effects of the application of pretreated rice straw with nitrogen fertilizer on soil nitrogen supply and spinach growth and quality[J]. *Soils*, 2004, 36(1): 37–42.
- [27] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, *et al.* Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219–246.
- [28] Liu G D, Li Y C, Alva A K. Moisture quotients for ammonia volatilization from four soils in potato production regions[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2007, 183(1–4): 115–127.
- [29] Thompson R B, Meisinger J J. Gaseous nitrogen losses and ammonia volatilization measurement following land application of cattle slurry in the mid-Atlantic region of the USA[J]. *Plant & Soil*, 2005, 266(1–2): 231–246.
- [30] 李欠欠. 脲酶抑制剂LIMUS对我国农田氮减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
- Li Q Q. Effect of urease inhibitor LIMUS on ammonia mitigation and crop yield and nitrogen use efficiency in different croplands of China[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.
- [31] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氮挥发损

- 失的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 263–269.
- Deng M H, Yin B, Zhang S L, *et al.* Effect of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 263–269.
- [32] 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.
- Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 46–48.
- [33] 周博, 高佳佳, 周建斌. 不同种类有机肥碳、氮矿化特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 366–373.
- Zhou B, Gao J J, Zhou J B. Carbon and nitrogen mineralization characteristics of different types of organic manures[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 366–373.
- [34] 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. Gaseous loss and balance of nitrogen from paddy field in irrigation area of the upper yellow river[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [35] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1073–1085.
- Hao X Y, Gao W, Wang Y J, *et al.* Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1073–1085.
- [36] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K E. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(29): 277–287.