

不同施肥类型下碱性壤土和酸性赤红壤清江白菜种植的氨挥发特征及排放系数

赵瑞, 冯雁辉, 姚玲爱, 马千里, 高加乾, 赵学敏

引用本文:

赵瑞, 冯雁辉, 姚玲爱, 马千里, 高加乾, 赵学敏. 不同施肥类型下碱性土和酸性赤红壤清江白菜种植的氨挥发特征及排放系数[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2552–2562.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0459>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同施肥方案对华南地区菜心种植氨挥发损失的影响

赵瑞, 冯雁辉, 马千里, 姚玲爱, 高加乾, 赵学敏

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 681–690 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0730>

化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响

周慧, 史海滨, 徐昭, 郭珈玮, 付小军, 李正中

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1649–1656 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1406>

抑制剂NBPT/DCD不同组合对灌区碱性灌淤土中氨挥发及有效氮积累量的影响

张惠, 王志国, 张晴雯, 丁金英, 尹爱军, 左莹

农业环境科学学报. 2015(3): 606–612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.026>

植被冠层氨释放及其对草地氨挥发贡献与源解析

白颖慧, 许迎浩, 吕慎强, 李嘉, 李惠通, 杨泽宇, 王林权

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2315–2326 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0156>

控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响

宋梓璇, 李虎, 李建政, 尹彩霞, 王迎春, 山楠, 王立刚

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2342–2349 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1762>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵瑞, 冯雁辉, 姚玲爱, 等. 不同施肥类型下碱性壤土和酸性赤红壤清江白菜种植的氨挥发特征及排放系数[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2552-2562.

ZHAO R, FENG Y H, YAO L A, et al. Ammonia volatilization characteristics and emission coefficients of Qingjiang cabbage in lou and lateritic red soil under different fertilizer types[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2552-2562.



开放科学 OSID

不同施肥类型下碱性壤土和酸性赤红壤清江白菜种植的氨挥发特征及排放系数

赵瑞¹, 冯雁辉¹, 姚玲爱^{1*}, 马千里¹, 高加乾², 赵学敏¹

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 广东天禾农资股份有限公司, 广州 510080)

摘要:为探究酸碱性土壤对氨挥发特征及排放系数的影响,为我国农田土壤氨排放清单的准确评估提供科学依据,于2018年2—5月,以壤土(碱性土壤)和赤红壤(酸性土壤)为研究对象,以清江白菜为试材,采用室外模拟场方法,设置土壤pH类型为A组,分别为碱性土壤(A1)和酸性土壤(A2);同时,设置氮肥类型为B组,分别为不施肥(B0)、尿素(B1)、碳酸氢铵(B2)、尿素与有机肥混施(B3)和复合肥(B4)共5组氮肥施用类型,开展正交试验。试验共设置10个处理,各处理的氮肥施用量均为200 kg·hm⁻²。清江白菜种植过程中,共施肥3次,其中基肥施肥方式为沟施覆土,第1次追肥为撒施,第2次追肥为撒施后灌水。采用通气法对两种土壤进行室外模拟原位氨挥发测定,研究了不同施肥类型下土壤氨挥发情况和不同土壤pH对土壤氨挥发的影响,并尝试确定氨排放系数。结果表明:清江白菜种植过程中的氨挥发几乎全部来自追肥,追肥期间碱性土壤氨挥发量占全生育期氨挥发总量的97%~98%,酸性土壤追肥期间氨挥发量占全生育期氨挥发总量的99%。对比不同施肥处理的氨挥发量,碱性土壤A1B1、A1B2、A1B3和A1B4处理的氨挥发总量之间差异显著($P<0.05$),呈现A1B2>A1B1>A1B3>A1B4的趋势,不同施肥类型氨挥发总量之间比值关系A1B1:A1B2:A1B3:A1B4为3:5:2:1;酸性土壤不同施肥处理的氨挥发总量之间也呈现A2B2>A2B1>A2B3>A2B4的趋势,不同施肥类型氨挥发总量比值关系A2B1:A2B2:A2B3:A2B4为3:15:3:1。碱性土壤各施肥类型氨挥发总量和氨排放系数显著($P<0.05$)高于酸性土壤各施肥类型。20~30℃气温条件下,碱性土壤不同施肥类型的氨排放系数为2.73%~3.03%(A1B1);5.27%~5.31%(A1B2);2.27%~2.67%(A1B3);1.07%~1.23%(A1B4)。酸性土壤不同施肥类型的氨排放系数为0.40%~0.78%(A2B1);2.75%~3.25%(A2B2);0.44%~0.52%(A2B3);0.18%~0.22%(A2B4)。研究表明,土壤酸碱性是影响农田氨挥发的重要因素之一,碱性土壤的氨挥发量和氨排放系数显著高于酸性土壤;复合肥是能够有效减少土壤氨挥发的施肥类型;覆土深施和撒施后灌水可以有效降低土壤的氨挥发损失率。

关键词:酸碱性土壤;氮肥施用类型;氨挥发;氨排放系数

中图分类号:S634.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2552-11 doi:10.11654/jaes.2022-0459

Ammonia volatilization characteristics and emission coefficients of Qingjiang cabbage in lou and lateritic red soil under different fertilizer types

ZHAO Rui¹, FENG Yanhui¹, YAO Ling'ai^{1*}, MA Qianli¹, GAO Jiaqian², ZHAO Xuemin¹

(1. South China Institute of Environment Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 2. Guangdong Tianhe Agricultural Means of Production Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The ammonia volatilization characteristics and emission coefficients of Qingjiang cabbage in acidic and alkaline soils were determined to provide a scientific basis for the accurate evaluation of farmland soil ammonia emission inventory in China. This study was

收稿日期:2022-05-07 录用日期:2022-07-26

作者简介:赵瑞(1985—),女,硕士,高级工程师,从事种植业氨排放监测与环境污染控制研究。E-mail:zhaorui@scies.org

*通信作者:姚玲爱 E-mail:yaolingai@scies.org

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202004-142)

Project supported: The Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, Ministry of Ecology and Environment, China (PM-zx703-202004-142)

conducted from February to May in 2018; Qingjiang cabbage was used as the test material and the method of outdoor simulation field was conducted. Soil pH type was set as group A, and two soil pH types were set: alkaline soil (A1) and acidic soil (A2). Concurrently, fertilizer type was set as group B, and five nitrogen fertilizer types were set: no fertilizer control (B0), urea (B1), ammonium bicarbonate (B2), urea and organic fertilizer (B3), and compound fertilizer (B4). There were 10 treatments in this study, and the nitrogen application rate in each treatment was $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. During Qingjiang cabbage planting, fertilizers were applied three times. The alkaline fertilizer was applied by furrow covering; the first topdressing was applied by spreading, while the second topdressing was irrigated after spreading. The ammonia volatilization of the two types of soil was measured by aeration method. The ammonia volatilization of soils under different fertilizer types, ammonia volatilization characteristics in acidic-alkaline soils, and the ammonia emission coefficient were determined. The results showed that topdressing during Qingjiang cabbage planting contributed to the most amount of ammonia volatilization. During topdressing, ammonia volatilization in alkaline soil accounted for 97%–98% of the total ammonia volatilization, while ammonia volatilization in acidic soil accounted for 99% of the total ammonia volatilization during the whole growth period. There was significant difference ($P < 0.05$) among the treatments in alkaline soil; the total ammonia volatilization in the different treatments were ranked as follows: $A1B2 > A1B1 > A1B3 > A1B4$. The ratio of total ammonia volatilization in alkaline soil were 3:5:2:1, corresponding to $A1B1:A1B2:A1B3:A1B4$. The total ammonia volatilization in the different treatments in acidic soil were ranked as follows: $A2B2 > A2B1 > A2B3 > A2B4$. The ratio of total ammonia volatilization in acidic soil was 3:15:3:1, corresponding to $A2B1:A2B2:A2B3:A2B4$. The total ammonia volatilization in alkaline soil was significantly higher than that in acidic soil ($P < 0.05$). Under the temperature range of 20°C to 30°C , the ammonia emission coefficients of different fertilizer types in alkaline soil were 2.73%–3.03% ($A1B1$), 5.27%–5.31% ($A1B2$), 2.27%–2.67% ($A1B3$), and 1.07%–1.23% ($A1B4$). Meanwhile, the ammonia emission coefficients of different fertilizer types in acidic soil were 0.40%–0.78% ($A2B1$), 2.75%–3.25% ($A2B2$), 0.44%–0.52% ($A2B3$), and 0.18%–0.22% ($A2B4$). The results indicated that soil pH was one of the important factors affecting ammonia volatilization in farmlands. The ammonia volatilization and emission coefficient of alkaline soil were significantly higher than those of acidic soil. Application of compound fertilizer with deep soil covering or irrigation of after spraying could significantly decrease ammonia volatilization and emission coefficient.

Keywords: acidic and alkaline soil; nitrogen application type; ammonia emission; ammonia emission coefficient

当前,农田施肥导致的氨排放是大气氨或铵盐的重要来源之一^[1-2],而氨是形成细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的重要前体物,对雾霾的形成起关键作用^[3-5]。因此,研究农田氨排放规律和影响因素对雾霾的防治具有一定的科学意义,对于氨减排措施的制定和实施具有一定的现实意义。我国农田氨排放占到氨气排放总量的50%左右^[6-9],影响农田氨排放的因素有以下几个方面,一是如氮肥类型在内的氮肥自身固有特性^[10-11],二是如气候(气温、湿度、光照和风速等)^[12-14]和土壤性质(土壤类型和理化特性等)等环境因素^[13,15-16],三是如氮肥施用量和施用方式等种植模式^[17-21]。诸多因素中土壤因素对农田氨挥发具有重要影响,土壤因素中的土壤类型、土壤pH及其他理化性质对土壤氮素的迁移转化等都有深刻影响,进而影响农田土壤氨挥发,所以农田土壤pH的不同会导致农田土壤氨挥发量的差异^[22-23]。因此,核算酸性和碱性农田土壤不同施肥类型下的氨排放量并估算氨排放系数,为我国氨排放清单的准确估算和大气环境质量的进一步提升具有积极意义。

目前,已有学者针对单一土壤类型对农田氨排放系数的影响开展研究^[23-24],而关于不同区域土壤pH对农田种植氨排放影响的研究较少。通常情况下,土

壤pH是影响菜地氨挥发的重要因素之一^[11,22],很多关于氨挥发模型的研究也均发现土壤pH是影响氨挥发量的重要因素之一^[25-26]。我国地域辽阔,秦岭-淮河以北以碱性土壤为主,秦岭-淮河以南以酸性土壤为主,然而鲜见关于南方酸性土壤和北方碱性土壤氨挥发量及氨排放系数的对比研究。目前,关于土壤pH的研究多局限于北方或者南方部分区域的土壤^[13,27],并且多以室内恒温模拟培养的方式研究单种氮肥类型氨挥发特征规律^[28-29]。然而,在没有作物吸收氮素养分的前提下得到的结论,其实际效果是需要通过田间试验进一步研究论证的。因此,本研究以北方碱性土壤壤土和南方酸性土壤赤红壤为研究对象,以清江白菜为试材,采用室外模拟场的方法探究北方碱性土壤和南方酸性土壤在不同施肥类型下土壤氨挥发特征和氨排放系数差异,估算不同施肥类型的氨挥发量关系,以期核算区域氨排放量和进一步准确制定区域大气污染控制策略提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广州市黄埔区($23^\circ 09' \text{N}$, $113^\circ 30'$)

E),属于南亚热带季风气候,具有夏长冬短、终年温暖、偶有奇寒、无霜期长、四季宜耕的特点。年均降雨量2 247 mm,主要集中在4—9月,这6个月降雨量占全年的82%。年平均温度为21℃,最冷月1月份平均气温为13.3℃,最热月7月份平均气温为28.4℃,气温年际变化较小。试验期间,降雨量为310.13 mm,平均气温为24.8℃(图1)。

1.2 试验材料

供试蔬菜为全国常见、成活率高、便于水肥管理的清江白菜,此类蔬菜在壤土和赤红壤上均有大量种植。

供试土壤为赤红壤和壤土,基本理化性质见表1。

供试肥料:尿素、碳酸氢铵、复合肥、有机肥、磷肥和钾肥。各类肥料的有效成分含量等信息详见表2。

1.3 试验设计

1.3.1 试验装置

本试验采用室外模拟场的方法,即使用PVC板制作长×宽×高为1.2 m×0.4 m×0.4 m的土槽,为使模拟状态接近现实,在土槽底部设置20个直径为0.5 cm的渗漏洞,用于渗水。收集的土壤样品按照0~20 cm和20~30 cm的顺序依次填入土槽,静置1~2个月,使土层自然沉降到稳定状态。

表2 供试肥料基本信息

Table 2 Basic information of test fertilizers

肥料类型 Fertilizer type	有效成分 Active ingredient
尿素 Urea	国产,含N量≥46.3%,执行GB 2440—2001标准 Domestic, N content ≥46.3%, in accordance with GB 2440—2001 standard
碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate	国产,含N量≥17.1%,执行GB 3559—2001标准 Domestic, N content ≥17.1%, in accordance with GB 3559—2001 standard
复合肥 Compound fertilizer	进口,含N量:15%;含P量:15%;含K量:15% Imported, N content: 15%; P content: 15%; K content: 15%
有机肥 Organic fertilizer	含N量:2.6%,含P量:4.7%,含K量:4.9% N content: 2.6%; P content: 4.7%; K content: 4.9%
磷肥 Phosphate fertilizer	含P量:12%;P content: 12%
钾肥 Potash fertilizer	含K量:60%;K content: 60%

1.3.2 试验处理

2018年2—5月选择广东省广州市黄埔区为试验区域,期间广州市平均气温大于20℃。选择广东省黄埔区的赤红壤和陕西省杨凌区的壤土分别作为酸性和碱性土壤的研究对象,供试蔬菜为清江白菜,设置5种氮肥施用类型处理,分别为不施肥、尿素、碳酸氢铵、复合肥、有机肥与尿素混施。开展正交试验,设

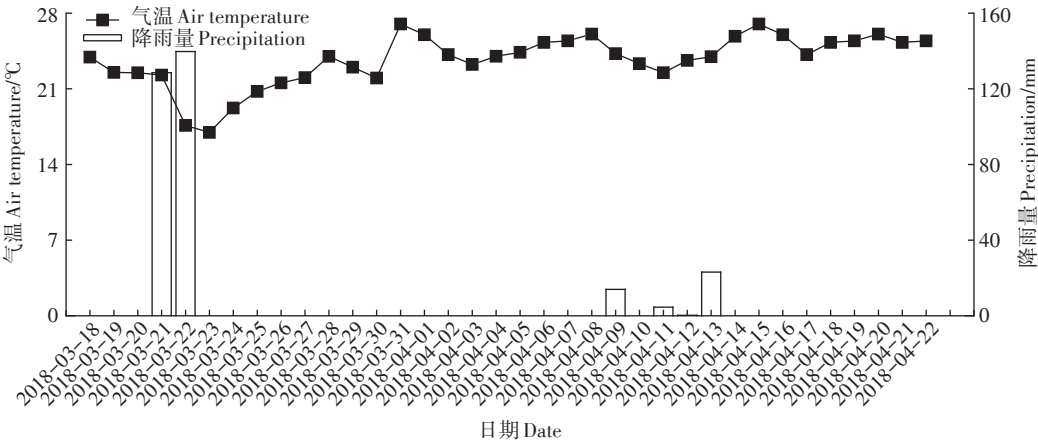


图1 监测期间的气温和降雨

Figure 1 Air temperature and precipitation during the monitoring period

表1 试验地点耕层土壤理化性质

Table 1 Physiochemical properties of experimental soils

土壤样品 Soil sample	pH	总氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	氨氮 Ammonia nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)
赤红壤 Lateritic red soil	6.3	2.6	13.1	4.8	17.0	89.6
壤土 Lou soil	8.1	2.8	12.9	3.7	7.8	72.6

置土壤pH类型为A组,壤土(碱性土壤)为A1,赤红壤(酸性土壤)为A2;施肥类型为B组,不施肥为B0,尿素为B1,碳酸氢铵为B2,有机肥和尿素混施为B3,复合肥为B4,试验共设置10个处理,分别为A1B0、A2B0、A1B1、A2B1、A1B2、A2B2、A1B3、A2B3、A1B4和A2B4,每个处理设置4个重复。清江白菜种植期间施1次基肥,2次追肥,采用当地农民习惯施氮量,基肥、第一次追肥和第二次追肥的施氮量分别占氮肥总量的60%、20%和20%。氮肥施用总量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,基肥施氮量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,两次追肥施氮量均为 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[30]。对于施用尿素、碳酸氢铵、有机肥与尿素混施的处理组,同时施用与复合肥处理组同量的磷肥和钾肥。基肥中磷、钾肥与氮肥一起覆土沟施,施肥深度为8 cm,施氮肥后盖土;第一次追肥氮肥撒施到土壤表面,第二次追肥采用撒施后灌水的施肥方式。田间水分管理采用当地农民传统的浇灌方法,通常在清江白菜苗移栽当日浇水一次,之后每隔3~4 d浇水1次,或视土壤干湿状况而定。

清江白菜采用育苗移栽的方式:于2018年2月14日播种,壤土是3月16日施基肥,3月25日第1次追肥,4月13日第2次追肥;赤红壤是2018年3月16日施基肥,3月21日第1次追肥,4月7日第2次追肥。种植规格为行株距 $12\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 。整个生育期67 d。统一灌溉、除草和喷洒农药防治病虫害等田间管理。

1.4 测定方法

本试验采用通气法监测氨挥发,该方法收集结构简单,操作简便,测定结果的准确度和精确度高,回收率可达99.5%^[31]。用PVC(聚乙烯硬质塑料管)制成内径15 cm、高15 cm的氨气捕获装置,将两块厚度为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL磷酸+40 mL丙三醇,定容至1 000 mL),置于硬质塑料管中,下层海绵置于管中部,用于吸收土壤中挥发出来的氨;上层海绵与管顶相平,用于防止外界气体污染。施肥后前6 d每日早上固定时间更换下层海绵,之后每3 d更换一次下层海绵,上层海绵每日更换一次,直到当日监测结果与不施肥处理组相比无明显变化为止。碱性土壤氨挥发监测过程持续了35 d,酸性土壤的氨挥发过程共持续了28 d。整个监测过程氨挥发装置保持固定位置,每日仅更换海绵。下层海绵样品用密封袋封好带回实验室,然后浸泡在300 mL的 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液中浸提,浸提液中的铵态氮用靛酚蓝比色法测定。

1.5 数据分析与处理

每日氨($\text{NH}_3\text{-N}$)挥发速率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)=通气法单个装置平均每日测得的氨量(mg)/[捕获装置的横截面积(m^2) $\times$ 每次连续收集时间(d)] $\times 10^{-2}$

氨挥发累积量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)即测定时期内每日氨挥发量总和。

氨排放系数(%)=[施肥区氨挥发量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)-不施肥处理氨挥发量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]/总施氮量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\times 100\%$

采用Excel 2010计算试验数据,用SPSS16.0软件进行单因素方差分析,用Duncan法比较同种土壤不同施肥类型处理间在 $P=0.05$ 水平上的差异显著性,用T检验法比较两种土壤同种施肥类型处理间在 $P=0.05$ 水平上的差异显著性,采用OringePro9.1绘图。

2 结果与分析

2.1 不同酸碱性土壤的氨挥发特征

2.1.1 碱性土壤氨挥发速率变化

清江白菜施基肥后各施肥类型氨挥发速率日变化不明显,不施肥(A1B0)、尿素(A1B1)、碳酸氢铵(A1B2)、尿素与有机肥混施(A1B3)和复合肥(A1B4)氨挥发速率10 d平均值分别为0.005、0.011、0.007、0.008 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.008 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (图2),氨挥发平均速率呈现 $\text{A1B1}>\text{A1B4}=\text{A1B3}>\text{A1B2}>\text{A1B0}$,尿素处理组是不施肥氨挥发平均速率的2倍,其他氮肥处理类型均与不施肥氨挥发平均速率接近。

第一次追肥期间,尿素(A1B1)和尿素与有机肥混施处理(A1B3)均在施肥后第3天达到氨挥发的峰值,A1B1和A1B3处理的氨挥发速率峰值分别为0.62 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.59 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,分别占18 d氨挥发量的12%和13%;碳酸氢铵处理(A1B2)施肥后第1天就达到氨挥发的高峰,氨挥发速率峰值为3.40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,占18 d氨挥发量的36%;复合肥处理(A1B4)的氨挥发速率则在施肥后第4天达高峰,峰值为0.46 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,占18 d氨挥发量的16%。不同施肥类型处理A1B1、A1B2、A1B3和A1B4氨挥发速率18 d的平均值分别为0.30、0.53、0.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和0.16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (图2)。对比不同施肥类型下追肥1的氨挥发速率平均值,表现为 $\text{A1B2}>\text{A1B1}>\text{A1B3}>\text{A1B4}$ 的规律(图2)。

第二次追肥期间,各施肥类型氨挥发速率与基肥类似,日变化不明显。不施肥(A1B0)、尿素(A1B1)、碳酸氢铵(A1B2)、尿素与有机肥混施(A1B3)和复合

肥(A1B4)氨挥发速率10 d平均值分别为0.008、0.011、0.013、0.017 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和0.008 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图2),氨挥发平均速率呈现 $\text{A1B3} > \text{A1B2} > \text{A1B1} > \text{A1B4} = \text{A1B0}$ 的规律,但各施肥类型处理组氨挥发速率平均值与不施肥处理差别较小,其中复合肥处理组与不施肥处理氨挥发速率相同。

2.1.2 酸性土壤氨挥发速率变化

对于酸性土壤,清江白菜施基肥后各施肥类型氨挥发速率日变化也不明显,监测6 d后已经与不施肥处理组的氨挥发速率无显著差异,不施肥(A2B0)、尿素(A2B1)、碳酸氢铵(A2B2)、尿素与有机肥混施(A2B3)和复合肥(A2B4)氨挥发速率10 d平均值分别为0.001、0.011、0.006、0.013 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和0.006 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图3),氨挥发平均速率呈现 $\text{A2B3} > \text{A2B1} > \text{A2B2} = \text{A2B4} > \text{A2B0}$,其中A2B3和A2B1氨挥发平均速率是A2B0的10倍左右,A2B2和A2B4的氨挥发平均

速率则是A2B0处理的6倍左右。

第一次追肥期间,A2B1处理在施肥后第4天达到氨挥发的峰值,为0.15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,占17 d氨挥发量的15.5%;A2B2处理施肥后第1天就达到氨挥发的高峰,为3.20 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,占17 d氨挥发量的60%;A2B3处理施肥后第6天氨挥发速率达到高峰,为0.27 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,占17 d氨挥发量的24.9%;A2B4处理的氨挥发速率则是在施肥后第10天达高峰,为0.29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,占17天氨挥发量的19.6%;A2B1、A2B2、A2B3和A2B4氨挥发速率17 d的平均值分别为0.06、0.34、0.07 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和0.02 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图3)。对比不同施肥类型下追肥1的氨挥发速率平均值,表现为 $\text{A2B2} > \text{A2B3} > \text{A2B1} > \text{A2B4}$ 的规律(图3)。

第二次追肥期间,各施肥类型氨挥发速率与基肥类似,日变化不明显。不施肥(A2B0)、尿素(A2B1)、碳酸氢铵(A2B2)、尿素与有机肥混施(A2B3)和复合

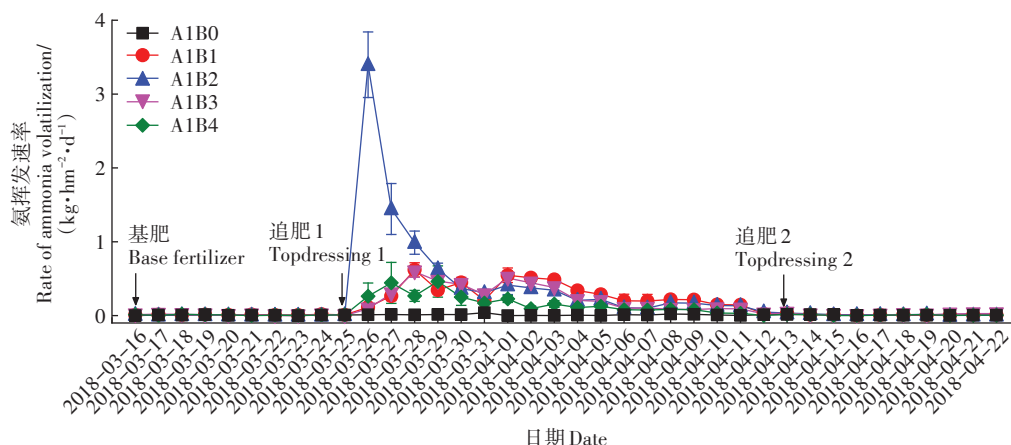


图2 碱性土壤不同氮肥类型氨挥发速率

Figure 2 Rate of ammonia volatilization under different fertilization types in alkaline soil

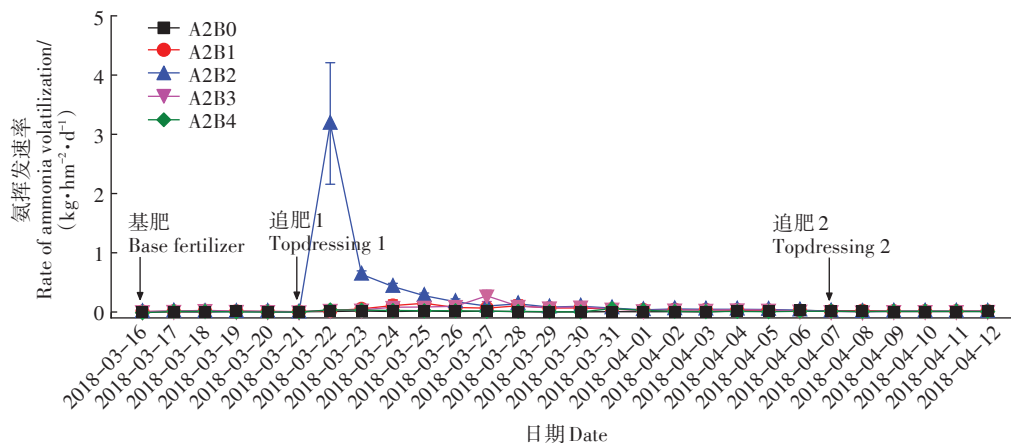


图3 酸性土壤不同氮肥类型氨挥发速率

Figure 3 Rate of ammonia volatilization under different fertilization types in acid soil

肥(A2B4)氨挥发速率10 d平均值分别为0.008、0.011、0.013、0.017 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和0.008 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图3),氨挥发平均速率呈现A2B3>A2B2>A2B1>A2B4=A2B0的规律,但各施肥类型处理组氨挥发速率平均值与不施肥处理差别较小,其中A2B4复合肥处理与不施肥处理氨挥发速率相同。

2.1.3 酸碱性土壤氨挥发平均速率的比较

采用T检验的方法分析碱性和酸性土壤同种氮肥类型氨挥发平均速率的差异(图4),结果发现,除了不施肥处理两种土壤氨挥发速率无显著差异外,其他施肥处理碱性土壤的氨挥发平均速率显著高于酸性土壤($P<0.05$)。

2.2 酸碱性土壤氨挥发累积量变化特征

2.2.1 碱性土壤不同施肥时期氨挥发累积量变化

对比不同施肥时期的氨挥发累积量,各施肥处理组均呈现第一次追肥的氨挥发累积量最高(图5),占全生育期氨挥发累积量的92%~97%,其中A1B1、A1B2、A1B3和A1B4施肥处理分别占当次氮肥施用量的13%、25%、12%和6%;基肥和第二次追肥的氨挥发累积量相对较低,分别占全生育期的1.4%~5%和1.3%~4.6%,基肥和第二次追肥各施肥类型处理组的氨挥发累积量分别占当次氮肥施用量的0.1%~0.2%和0.2%~0.6%。

对比不同施肥时期各施肥类型的氨挥发累积量,基肥时期各个施氮处理的氨挥发累积量之间差异不显著,但第二次追肥A1B2、A1B3和A1B4施肥处理之间存在显著差异,呈现A1B3>A1B2>A1B4的趋势。第一次追肥各施肥处理间也存在显著差异,呈现

A1B2>A1B1>A1B3>A1B4的趋势(图5)。

对比不同施肥方式下的氨挥发累积量,第一次追肥(表面撒施)单次施肥的氨挥发累积量高于第二次追肥(撒施后灌水)的氨挥发累积量和基肥(沟施覆土)的氨挥发累积量(图5)。

2.2.2 酸性土壤不同施肥时期氨挥发累积量变化

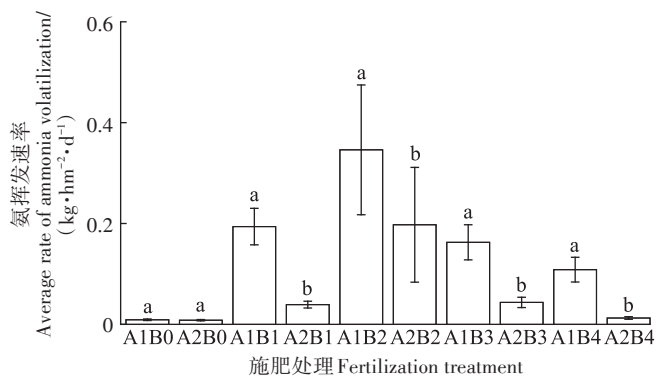
对比不同施肥时期的氨挥发累积量,各施肥处理组均呈现第一次追肥的氨挥发累积量最高(图6),占全生育期氨挥发累积量的85%~98%,其中A2B1、A2B2、A2B3和A2B4分别占当次氮肥施用量的3.4%、14.7%、2.2%和0.8%;基肥和第二次追肥的氨挥发累积量相对较低,分别占全生育期的0.6%~7.5%和1.3%~13.9%,基肥和第二次追肥各施肥类型处理组的氨挥发累积量分别占当次氮肥施用量的0~0.1%和0.1%~0.2%。

对比不同施肥时期各施肥类型的氨挥发累积量,基肥时期A2B1、A2B2和A2B3施肥处理之间差异不显著,而A2B1和A2B3的氨挥发累积量则显著高于A2B4;第二次追肥则是A2B1处理氨挥发累积量显著高于A2B3和A2B4,其他施肥类型之间则不存在显著差异。第一次追肥则是A2B2处理显著高于其他处理,而其他处理之间差异不显著,但与碱性土壤类似,也呈现A2B2>A2B1>A2B3>A2B4的趋势(图6)。

对比不同施肥方式下的氨挥发累积量,也呈现第一次追肥(表面撒施)单次施肥的氨挥发系数高于第二次追肥(撒施后灌水)和基肥(沟施覆土)的氨挥发系数(图6)。

2.3 酸碱性土壤氨挥发累积量及氨排放系数比较

从清江白菜全生育期氨挥发累积量看(表3),碱性土壤尿素(A1B1)、碳酸氢铵(A1B2)、有机肥与尿



同一施肥类型不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同
Different lowercase letters in the same fertilization type indicate significant differences among treatments ($P<0.05$), the same below

图4 酸碱性土壤氨挥发平均速率

Figure 4 Average rate of ammonia volatilization in acid and alkaline soil

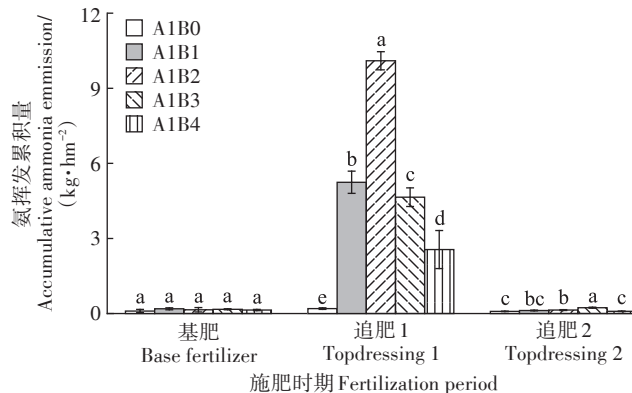


图5 碱性土壤不同施肥时期氨挥发累积量

Figure 5 Accumulative ammonia emission relative to different fertilization periods in alkaline soil

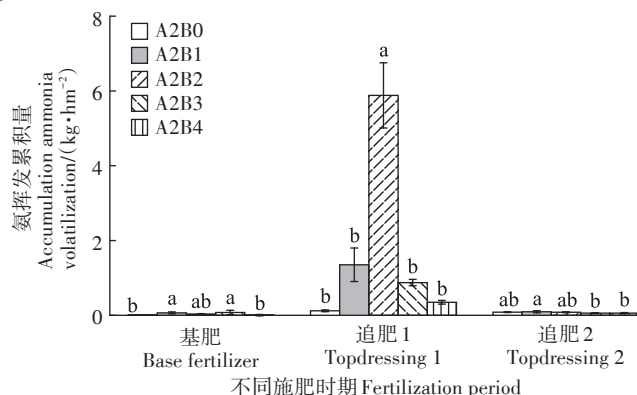


图6 酸性土壤不同施肥时期氨挥发累积量

Figure 6 Accumulative ammonia emission relative to different fertilization periods in acid soil

素混施(A1B3)和复合肥(A1B4)处理的氨挥发累积量之间差异显著($P<0.05$),呈现 $A1B2>A1B1>A1B3>A1B4$ 的趋势,不同氮肥处理间氨挥发系数也表现为同样的变化趋势。不同施肥类型氨挥发总量和氨排放系数之间的比值关系 $A1B1:A1B2:A1B3:A1B4$ 为 $3:5:2:1$ 。

酸性土壤尿素(A2B1)、碳酸氢铵(A2B2)、有机肥与尿素混施(A2B3)和复合肥(A2B4)处理的氨挥发总量之间也呈现 $A2B2>A2B1>A2B3>A2B4$ 的趋势,不同氮肥类型间氨挥发系数也表现为同样的变化趋势,但酸性土壤的碳酸氢铵(A2B2)的氨挥发量显著高于其他氮肥($P<0.05$),其他氮肥类型间氨挥发总量间差异不显著。不同施肥类型氨挥发总量和氨排放系数之间的比值关系 $A1B1:A1B2:A1B3:A1B4$ 为 $3:15:3:1$ (表3)。

采用T检验的方法分析碱性和酸性土壤同种氮肥类型氨挥发累积量的差异,结果发现相同氮肥类型处理呈现碱性土壤氨挥发累积量显著高于酸性土壤,具体表现为 $A1B1>A2B1$ ($T=40.55, P<0.05$), $A1B2>A2B2$ ($T=114.44, P<0.01$), $A1B3>A2B3$ ($T=22.87, P<0.05$), $A1B4>A2B4$ ($T=23.83, P<0.05$)。碱性土壤各施肥处理氨挥发总量显著高于酸性土壤,具体表现为碱性土壤尿素(A1B1)、碳酸氢铵(A1B2)、有机肥与尿素混施(A1B3)和复合肥(A1B4)处理氨挥发总量分别是酸性土壤 A2B1、A2B2、A2B3 和 A2B4 处理氨挥发总量的4.83、1.76、5.05倍和5.75倍(图7)。

3 讨论

3.1 不同氮肥类型对氨挥发的影响

本研究发现无论是碱性土壤还是酸性土壤,在相同的施氮量和施肥方式下,尿素 B1、碳酸氢铵 B2、尿

表3 酸碱性土壤氨挥发累积量及氨排放系数

Table 3 Accumulative ammonia volatilization and ammonia volatilization coefficient in acid and alkaline soil

土壤酸碱性 Soil acidity and alkalinity	处理 Treatment	氨挥发累积量 Accumulative ammonia emission/(kg·hm ⁻²)	氨排放系数 Ammonia emission factor/%
碱性土壤 Alkaline soil	A1B0	0.35±0.12d	0
	A1B1	5.77±0.29b	2.88±0.15b
	A1B2	10.58±0.05a	5.29±0.02a
	A1B3	4.95±0.39c	2.47±0.20c
	A1B4	2.30±0.16d	1.15±0.08d
酸性土壤 Acid soil	A2B0	0.21±0.02b	0
	A2B1	1.18±0.31b	0.59±0.19b
	A2B2	6.00±0.51a	3.00±0.25a
	A2B3	0.98±0.08b	0.48±0.04b
	A2B4	0.40±0.03b	0.20±0.02b

注:不同小写字母表示同种土壤类型不同氮肥处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen fertilizer treatments in the same soil type ($P<0.05$).

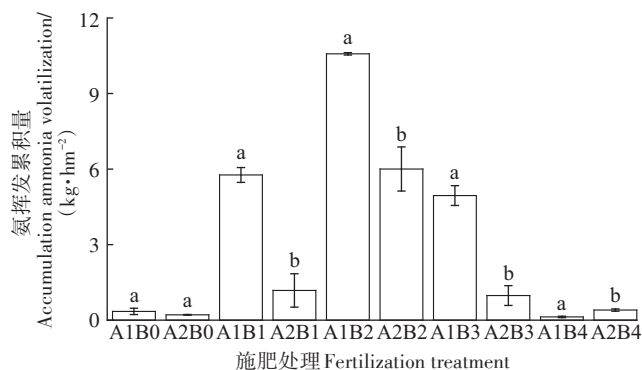


图7 酸碱性土壤氨挥发累积量

Figure 7 Accumulative ammonia emission relative to acidity and alkalinity soil

素与有机肥混施 B3 和复合肥 B4 施用后的全生育期氨挥发量和氨挥发系数均呈现 $B2>B1>B3>B4$ 的趋势,尿素和碳酸氢铵的氨挥发损失率比其他氮肥类型高。研究表明,尿素和碳酸氢铵是我国使用的主要氮肥类型,也是挥发量最大的两种氮肥类型,施用碳酸氢铵后的氨挥发速率大于尿素^[22,32]。本研究也发现第1次追肥时采用表面撒施的方式施用碳酸氢铵后第1天就会达到氨挥发速率高峰,而尿素则是在施用后第3、4天达到氨挥发速率的高峰,其他研究也有类似的结果^[33-34]。这是因为碳酸氢铵在所有氮肥中最易挥发,撒施到土壤表层后不需经过转化直接以铵根离子的形态存在,氨挥发非常迅速。而尿素需要经过2~3 d脲酶水解转化为碳酸铵才能挥发,因此挥发速

率相对碳酸氢铵小^[22,28]。本研究发现尿素与有机肥混施处理组(比例为1:1)氨挥发量相对单施尿素处理分别降低了14%(碱性土壤)和17%(酸性土壤),前人研究也发现增加氮肥中有机肥比例可有效降低氨挥发。贾明飞等^[35]研究发现日光温室番茄生产过程中,增施有机肥和减少氮肥用量的施肥方案氨挥发累积量较常规施肥方案分别降低8%~26%和14%~34%。郝小雨等^[12]的研究表明,与传统施肥相比,有机与无机肥配施可有效降低47.9%~50.0%的氨挥发损失。这是因为有机质在分解过程产生的有机酸使土壤pH降低,有效阻止由尿素水解引起的土壤pH升高,同时增加的腐殖质增强了土壤的吸附能力,可以起到抑制氨挥发的作用^[10,36-37]。此外,有机肥配施氮肥能够向土壤供应充足的碳源和氮源,促进土壤微生物分解有机质,而分解过程会将无机氮固定转化成有机氮,从而减少了产生氨的无机氮数量,最终降低氨挥发损失量^[23]。此外,用有机肥替代部分化肥后,减少了无机氮的投入量,进而导致土壤铵态氮相对降低,能够明显降低氨挥发损失量。本研究发现碱性土壤复合肥施用后氨挥发量相比尿素和碳酸氢铵处理分别减少60%和78%,酸性土壤复合肥施用后氨挥发量相比尿素和碳酸氢铵处理分别减少66%和93%,相比添加有机肥,施用复合肥的减排效果更明显。究其原因,可能在于复合肥不同于尿素和碳酸氢铵的氮素形态,以及施用后对土壤铵离子的浓度影响受制于水解或者酶解的速度^[33]。从氨挥发损失率看,酸性壤土呈现碳酸氢铵>尿素>尿素与有机肥混施>复合肥的规律,碱性土壤也呈现同样的规律,表明复合肥是氨挥发风险较低的氮肥类型。

3.2 基肥和追肥氨挥发的差异

从清江白菜不同施肥时期看,碱性土壤清江白菜种植全生育期的氨挥发量90%以上来自第一次追肥,剩余10%左右来自于基肥和第二次追肥的氨挥发量;酸性土壤清江白菜种植全生育期的氨挥发量85%以上来自于第一次追肥,15%左右由基肥和第二次追肥贡献。对于酸性和碱性土壤,基肥的施肥量比第一次追肥多20%,然而不同施肥处理尿素、碳酸氢铵、尿素与有机肥混施和复合肥的氨挥发量却比第一次追肥少95%~96%、98%~96%、91%~96%和98%~95%。第二次追肥的施氮量与第一次追肥相同,而不同施肥处理尿素、碳酸氢铵、尿素与有机肥混施和复合肥的氨挥发量却比第一次追肥降低了93%~97%、94%~99%、95%~99%和88%~98%。这主要是施肥方

式的差异,本次基肥是采用沟施覆土的施肥方式,施肥深度为8 cm左右。有研究发现氨挥发量会随着施肥深度的增加而降低^[38]。与项目组前期研究结果(酸性土壤尿素沟施覆土氨挥发损失率7%)相比^[21],本次研究酸性土壤基肥阶段氨挥发速率(尿素沟施覆土氨挥发损失率0.6%)非常低,可能与沟施覆土的深度有关,前期沟施覆土深度为2~3 cm,而本次深度则为8 cm。有学者在酸性土壤上的研究发现尿素表施的氨挥发损失率为50%,每深施1 cm可减少7%的氨挥发损失率,当施肥深度大于7.5 cm时,氨挥发损失可忽略不计^[39-40]。ROCHETTE等^[39]和张翀等^[41]研究均发现尿素深施比表面撒施可减少90%左右的氨挥发,具有很好的减排效果。另外,基肥施用前期的大量降雨(第4、5天两天降雨量达到268 mm)也可能是造成其氨挥发速率低的关键因素。研究表明,当土壤较为干燥时,少量降雨或灌溉会加速尿素的水解,同时还会阻碍空气进入土壤,抑制氨氧化过程的发生,增加液相中铵根离子所占氮素的形态比,进而促进氨挥发,增加氨挥发损失量。但当降雨量或者灌溉水量较大时,尿素在水解前会随水下渗到深层土壤中,增加了土壤颗粒对铵态氮的吸附概率或者被作物吸收的概率,从而抑制土壤中的氨挥发^[12-13,15,19]。本试验中,第二次追肥期间采用撒施后灌溉的施肥方式,可能与灌溉水量大,有利于肥料随水下渗到深层土壤导致氨挥发速率降低有关,这也与项目组前期研究结果一致。有学者综合大量研究结果分析发现氮肥深施或者表施后灌水均是减少氨挥发的有效措施,分别能降低55%和35%的氨挥发损失^[42]。由此可见,氮肥深施和表施后灌水可以作为壤土和赤红壤农业种植氨减排的有效措施。

3.3 酸性和碱性土壤氨挥发的比较

土壤pH是影响菜地氨挥发的重要因素之一^[22,43]。研究表明,土壤pH和H⁺的缓冲能力是影响氮肥氨挥发的一个主要因子。碱性条件有利于水溶态NH₃的形成,进而促进氨挥发。酸性或中性条件下H⁺浓度较高,会降低水溶态NH₃的产生,提高NH₄⁺的浓度,进而抑制氨挥发^[44]。在气温25℃、pH值为6.0时土壤液相的氨氮比例很低,仅占氨氮和铵根离子的0.06%,氨挥发潜力非常弱^[15];另外,酸性土壤由于土壤pH较低,对氨具有较强的中和、吸附作用,其氨挥发损失一般较低。土壤高pH有利于铵根离子向氨气的转化,能够促进氨挥发^[45]。有研究发现pH为7.3~8.5的土壤氨挥发量比pH为5.5~7.3的土壤高39%^[29]。还有研究发现,在土壤pH介于6~8时,每增加一个

pH单位, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量占其总量的比例约增加10倍, 当土壤pH介于8~9时, 又增加5~10倍。土壤中氨的挥发速率也随着表层土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的增大而增加^[22]。在相同的环境和施肥处理条件下, 本研究发现施肥后碱性土壤(塬土)的氨挥发累积量和氨挥发系数都显著高于酸性土壤(赤红壤), 碱性土壤A1B1、A1B2、A1B3和A1B4处理的氨挥发量和氨挥发系数分别是酸性土壤的4.89、1.76、5.05倍和5.75倍, 充分说明酸性土壤氨挥发损失率小于碱性土壤。另外, 相比环保部《大气氨源排放清单编制技术指南》针对碱性土壤(20~30℃, 尿素16.66%, 碳酸氢铵7.84%)和酸性土壤(20~30℃, 尿素4.50%, 碳酸氢铵3.52%)氨排放系数, 本研究结果碱性土壤(20~30℃, 尿素2.73%~3.03%, 碳酸氢铵5.27%~5.31%)整体偏低。一方面是施肥方式的影响, 本研究基肥采取的是沟施覆土的施肥方式, 基肥的施氮量占40%, 但氨气挥发量却仅占全生育期氨挥发量的7.5%以下; 第二次追肥采用的是表面撒施后灌水的施肥方式, 施氮量与第一次追肥相同, 但氨气挥发量却仅占到全生育期氨挥发累积量的14%以下, 氮肥深施和表施后灌水都会减少氨挥发, 从而降低了氨挥发系数。另一方面, 通气法可能由于收集装置的空间狭小, 限制了空气正常流通, 进而低估了氨气的挥发^[24, 46], 所以后续采用多样化的监测方法, 有助于对酸性和碱性土壤氨挥发系数的进一步优化。另有研究发现, 土壤pH相近但土壤质地不同也会导致氨挥发系数的差异, 例如砂姜黑土因其黏性较高与粉砂土壤相比氨挥发量低很多, 后续研究也需关注土壤质地对氨挥发影响的差异。此外, 本研究所用的塬土主要分布于陕西省的关中平原, 该区域属暖温带半湿润季风气候, 年均温12~14℃, 年均降雨量530~750 mm^[47], 与试验地所在区域气候差异较大, 可能与塬土实际所在区域氨挥发情况存在差异, 后续研究需要关注并根据气候差异调整塬土的氨挥发系数。

4 结论

(1) 清江白菜种植过程中的氨挥发几乎全部来自追肥, 追肥期间碱性土壤氨挥发累积量占全生育期氨挥发累积量的97%~98%, 酸性土壤氨追肥期挥发累积量占全生育期氨挥发累积量的99%。

(2) 碱性土壤(塬土)不同施肥处理氨挥发累积量之间差异显著($P<0.05$), 碳酸氢铵和尿素是氨挥发量较大的两种施肥类型, 复合肥是氨挥发风险较低的施肥类型; 酸性土壤不同施肥处理中碳酸氢铵是氨挥发

量最大的施肥类型, 其他氮肥处理氨挥发差异不显著。

(3) 20~30℃气温条件下, 碱性土壤各施肥处理的氨挥发累积量显著($P<0.05$)高于酸性土壤各施肥类型的氨挥发累积量。

(4) 根据本研究结果, 推荐塬土和赤红壤农业种植过程中采用氮肥深施和表施后灌水的施肥方式, 同时采用氨挥发风险较低的氮肥类型, 可以有效降低氨挥发损失。

参考文献:

- [1] PAN Y P, TIAN S L, LIU D W, et al. Source apportionment of aerosol ammonium in an ammonia rich atmosphere: An isotopic study of summer clean and hazy days in urban Beijing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(10): 5681-5689.
- [2] ZHANG Q Q, PAN Y P, HE Y X, et al. Bias in ammonia emission inventory and implications on emission control of nitrogen oxides over North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 214: 116869.
- [3] FENG L, LIAO W J. Legislation, plans, and policies for prevention and control of air pollution in China: Achievements, challenges, and improvements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1549-1558.
- [4] HO K F, HO S S H, HUANG R J, et al. Chemical composition and bioreactivity of $\text{PM}_{2.5}$ during 2013 haze events in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 162-170.
- [5] YANG F, TAN J, ZHAO Q, et al. Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(11): 5207-5219.
- [6] ERISMAN J W, BLEEKER A, HENSEN A, et al. Agricultural air quality in Europe and the future perspectives[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 3209-3217.
- [7] GU B, SUTTON M A, CHANG J, et al. Agricultural ammonia emissions contribute to China's urban air pollution[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 265-266.
- [8] GALLOWAY J N, DENTENE R F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [9] GAO Z L, MA W Q, ZHU G D, et al. Estimating farm gate ammonia emissions from major animal production systems in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 20-28.
- [10] 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 combined application of manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 567-577.
- [11] 吕宏菲, 马星霞, 杨改河, 等. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 513-522. LÜ H F, MA X X, YANG G H, et al. Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat-maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*

- ture, 2020, 28(4):513-522.
- [12] 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氨挥发的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(21):4403-4414. HAO X Y, GAO W, WANG Y J, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization from greenhouse vegetable soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(21):4403-4414.
- [13] 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. Ammonia volatilization and its influencing factors in tea garden soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):808-816.
- [14] 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 等. 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力[J]. 环境科学, 2022, 43(2):1108-1128. XU C, MIAO W L, NI Y Z, et al. Emission characteristics, transformation mechanism, and reduction potential of ammonia emissions from a crop rotation system in Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2):1108-1128.
- [15] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2):253-259. HE F Y, YIN B, JIN X X, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):253-259.
- [16] 李洪杰, 赵同凯, 孙明, 等. 不同氮肥运筹对潮土区冬小麦产量及土壤氨挥发的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(11):51-55. LI H J, ZHAO T K, SUN M, et al. Effects of different nitrogen fertilizer application on winter wheat yield and soil ammonia volatilization in fluvo-aquic soil region[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(11):51-55.
- [17] 罗付香, 林超文, 刘海涛, 等. 不同施氮量对紫色土大白菜季产量和氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3):685-692. LUO F X, LIN C W, LIU H T, et al. Effect of nitrogen rates on cabbage yield and ammonia volatilization in purple soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3):685-692.
- [18] 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 outdoor cabbage soil in Beijing area based on different nitrogen application rate[J]. *Northern Horticulture*, 2017(13):140-147.
- [19] 王远, 许纪元, 潘云枫, 等. 长江下游地区水肥一体化对设施番茄氮肥利用率及氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(6):776-785. WANG Y, XU J Y, PAN Y F, et al. Effects of fertigation on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in greenhouse tomato cultivation in lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(6):776-785.
- [20] 沈仕洲, 杨艳, 王瑞琦, 等. 施肥对云南洱海流域蒜田土壤氨挥发和大蒜产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3):470-479. SHEN S Z, YANG Y, WANG R Q, et al. Effects of fertilization on ammonia volatilization and garlic yield in Erhai Lake basin of Yunnan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3):470-479.
- [21] 赵瑞, 冯雁辉, 马千里, 等. 不同施肥方案对华南地区菜心种植氨挥发损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3):681-690. ZHAO R, FENG Y H, MA Q L, et al. Effects of different fertilization schemes on soil ammonia volatilization during flowering cabbage growth in South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3):681-690.
- [22] 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. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1):149-162.
- [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. DONG W X, WU D M, HU C S, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5):1115-1121.
- [24] 吕金岭, 王小非, 骆晓声, 等. 减氮条件下砂壤质潮土区小麦-玉米轮作体系氨挥发特征及排放系数[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2):346-359. LÜ J L, WANG X F, LUO X S, et al. Ammonia volatilization characteristics and emission coefficients of wheat and maize rotation in sandy fluvo-aquic soil under reduced N fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2):346-359.
- [25] VELTHOF G L, OUDENDAG D, WITZKE H R, et al. Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2):402-417.
- [26] NYORD T, SCHELDE K M, SOGAARD H T, et al. A simple model for assessing ammonia emission from ammoniacal fertilizers as affected by pH and injection into soil[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(19):4656-4664.
- [27] 吕金岭, 王小非, 李太魁, 等. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(12):1869-1879. LÜ J L, WANG X F, LI T K, et al. Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12):1869-1879.
- [28] 张庆利, 张民, 杨越超, 等. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氨挥发特性研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):32-34. ZHANG Q L, ZHANG M, YANG Y C, et al. Volatilization of ammonium bicarbonate and urea in main soil of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1):32-34.
- [29] 魏玉云. 热带地区砖红壤上不同土壤pH和含水量对尿素氨挥发的影响研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2006:1-16. WEI Y Y. Study on the volatilization difference of ammonia from latosols with different soil pH and different soil water content[D]. Haikou: South China University of Tropical Agriculture, 2006:1-16.
- [30] 官利兰, 伏广农, 徐鹏举, 等. 广东省菜园土壤施肥状况调查与分析[J]. 南方农业学报, 2014, 45(3):420-424. GUAN L L, FU G N, XU P J, et al. Investigation and analysis of fertilization status of vegetable soil in Guangdong Province[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(3):420-424.
- [31] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通

- 气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209. WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205-209.
- [32] 罗微, 茶正早, 屈明, 等. 砖红壤中氨挥发特征研究初报[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 118-122. LUO W, CHA Z Z, QU M, et al. Vitalization of ammonia from latosol son after application of fertilizers[J]. *Journal of Argo-Environment Science*, 2005, 24(1): 118-122.
- [33] 陈艳秋, 陈洁, 胡智涛, 等. 蒜田氨挥发特征及其影响因素[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(1): 58-66. CHEN Y Q, CHEN J, HU Z T, et al. Characteristics and influencing factors of ammonia volatilization in garlic field[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(1): 58-66.
- [34] CAI G X, CHEN D L, DING H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 187-195.
- [35] 贾明飞, 乜兰春, 崔强, 等. 不同施肥方案对日光温室土壤氨挥发及番茄产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(20): 44-53. JIA M F, NIE L C, CUI Q, et al. Effects of different fertilization schemes on soil ammonia volatilization, yield and quality of tomato in solar greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2020(20): 44-53.
- [36] 卢丽兰, 甘炳春, 许明会, 等. 不同施肥与灌水量对槟榔土壤氨挥发的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4477-4484. LU L L, GAN B C, XU M H, et al. Effect of different fertilization and irrigation practices on soil ammonia volatilization of Arecanut (*Areca catechu* L.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4477-4484.
- [37] 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 chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2010, 24(5): 199-203.
- [38] 徐万里, 刘骅, 张云舒, 等. 施肥深度、灌水条件和氨挥发监测方法对氮肥氨挥发特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 86-93. XU W L, LIU H, ZHANG Y S, et al. Influence of the fertilization depth, irrigation and the ammonia volatilization monitoring method on ammonia volatilization characters of nitrogen fertilizer[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(1): 86-93.
- [39] ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: How deep to incorporate urea? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(6): 1635-1642.
- [40] 艾绍英, 姚建武, 刘国坚, 等. 热带亚热带多雨湿润区旱地土壤尿素氨挥发研究[J]. 中国农学通报, 1999, 15(6): 13-17. AI S Y, YAO J W, LIU G J, et al. Study on ammonia loss by volatilization for urea fertilized to dry land in the tropics and sub tropics[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 1999, 15(6): 13-17.
- [41] 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. ZHANG C, LI X Q, SU F, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1194-1201.
- [42] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2016, 232: 283-289.
- [43] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1610-1613. LI J M, LI D C, XU M G, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice corpping system[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1610-1613.
- [44] 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 pH of the nutrition solution[J]. *Plant Physiology*, 1983, 71: 618-622.
- [45] 王大鹏, 杜玉赫, 罗雪华, 等. 橡胶林下砖红壤不同氮肥处理氨挥发特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 685-691. WANG D P, DU Y H, LUO X H, et al. Characteristics of ammonia volatilization under different nitrogen managements in red latosol of rubber plantation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(4): 685-691.
- [46] LIU T Q, HUANG J F, CHAI K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH₃ volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in central China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 385.
- [47] 吴娟, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 关中地区壤土系统分类归属及代表土系建立[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 357-371. WU J, QI Y B, CHANG Q R, et al. Attribution of lou soil in Chinese soil taxonomy and establishment of representative soil series in Guanzhong area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 357-371.

(责任编辑:叶飞)