



秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氨挥发及小麦产量的影响

王小非, 寇长林, 李太魁, 骆晓声, 毛保民, 冀建华

引用本文:

王小非, 寇长林, 李太魁, 等. 秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氨挥发及小麦产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 227-236.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.1020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物质炭对华北平原4种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响

张水清, 张博, 岳克, 孙贇, 张秀玲, 林杉, 黄绍敏

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 127-134 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0005>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503-510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军, 张卫建, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 422-430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0103>

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 58-65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>

山东省农业源氨排放清单研究

杨新明, 庄涛, 周伟, 韩磊

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 568-574 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0111>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王小非, 寇长林, 李太魁, 等. 秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氨挥发及小麦产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 227-236.

WANG X F, KOU C L, LI T K, et al. Effects of straw biochar and carbon-based fertilizer on ammonia volatilization and wheat yield in winter wheat field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2026, 43(1): 227-236.



开放科学 OSID

秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氨挥发及小麦产量的影响

王小非^{1,2}, 寇长林^{1,2}, 李太魁^{1,2}, 骆晓声^{1,2}, 毛保民¹, 冀建华^{3*}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 河南省农业资源与环境重点实验室, 郑州 410105; 3. 河南省土壤肥料站, 郑州 450000)

摘要:为探究秸秆生物炭与炭基肥对冬小麦田氨挥发特征及小麦产量的影响,为农业废弃物资源化利用与农田氨减排提供理论依据与科学指导,本研究于2018年10月至2021年6月,在华北平原潮土区冬小麦-夏玉米轮作体系下进行了连续3年的田间定位试验。试验设置4个处理:不施肥(CK)、单施化肥(CF)、单施化肥+秸秆生物炭(BF)和施炭基肥(BBF),测定分析了小麦季氨挥发速率及小麦产量。结果表明:基肥期各施肥处理的氨挥发速率均呈现先升高后降低的变化趋势,追肥期呈现逐渐降低趋势;连续3年小麦季,BF和BBF处理的年度氨累积排放量比CF处理分别降低了15.0%~27.3%和25.9%~28.8%,BBF处理的平均年度氨累积排放量最低,分别比CF和BF处理降低了27.3%和8.2%;施秸秆生物炭与炭基肥均能有效降低小麦季年度氨排放系数与单位产量氨排放量,BBF处理氨排放系数和单位产量氨排放量最低,分别为2.11%~2.64%和1.06~1.51 g·kg⁻¹;施秸秆生物炭与炭基肥均能提高小麦籽粒产量,与CF相比,BF与BBF处理分别增加了4.4%~8.4%和4.1%~13.2%,BBF处理增产效果最好,3年的平均小麦籽粒产量比CF处理增加了5.7%。本试验条件下,炭基肥的氨减排与增产效果最佳,可作为华北平原潮土区农业氨减排及小麦增产的新型施肥技术模式进行推广。

关键词:秸秆生物炭;炭基肥;氨排放通量;氨累积排放量;氨排放系数;小麦产量

doi: 10.13254/j.jare.2024.1020

Effects of straw biochar and carbon-based fertilizer on ammonia volatilization and wheat yield in winter wheat field

WANG Xiaofei^{1,2}, KOU Changlin^{1,2}, LI Taikui^{1,2}, LUO Xiaosheng^{1,2}, MAO Baomin¹, JI Jianhua^{3*}

(1. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhengzhou 410105, China; 3. Henan Soil and Fertilizer Station, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to explore the effects of straw biochar and carbon-based fertilizer on ammonia volatilization characteristics and wheat yield in winter wheat field, and provide theoretical basis and scientific guidance for agricultural waste resource utilization and ammonia emission reduction in farmland, from October 2018 to June 2021, a field experiment was conducted, under the winter wheat-summer corn rotation system in the fluvo-aquic soil area of North China Plain for three consecutive years. Four treatments were set up: no fertilization (CK), single chemical fertilizer (CF), single chemical fertilizer+straw biochar (BF) and carbon-based fertilizer (BBF), for measuring and analyzing ammonia volatilization rate and wheat yield of wheat season. The results showed that the ammonia volatilization rate of each fertilization treatment showed a trend of increasing first and then decreasing at the base fertilizer stage, and gradually decreased at the topdressing stage. In the wheat season for three consecutive years, the annual cumulative ammonia emission of BF and BBF treatments decreased by 15.0%–27.3% and 25.9%–28.8%, respectively compared with CF treatment. The average annual cumulative ammonia emission of BBF treatment was the lowest, which was 27.3% and 8.2% lower than that of CF and BF treatments, respectively. Straw biochar

收稿日期:2024-12-19 录用日期:2025-02-17

作者简介:王小非(1992—),男,硕士,助理研究员,主要从事农田气体排放方面的研究。E-mail:xf_wang92@126.com

*通信作者:冀建华 E-mail:13838138453@163.com

基金项目:河南省农业科学院自主创新项目(2025ZC102);国家重点研发计划项目(2017YFD0800603);河南省重大科技专项(221100110700)

and carbon-based fertilizer could effectively reduce the ammonia emission coefficient and ammonia emission per unit yield of wheat season. The annual ammonia emission coefficient and ammonia emission per unit yield of BBF treatment were the lowest, which were 2.11%–2.64% and 1.06–1.51 g·kg⁻¹, respectively. Both straw biochar and carbon-based fertilizer could improve wheat grain yield, compared with CF treatment, BF and BBF treatments increased by 4.4%–8.4% and 4.1%–13.2%, respectively. BBF treatment had the best yield-increasing effect, and the average yield of wheat in three years increased by 5.7% compared with CF treatment. Under the experimental conditions, the effect of carbon-based fertilizer on ammonia emission reduction and yield increase is the best, which can be popularized as a new fertilization technology model for agricultural ammonia emission reduction and wheat yield increase in the fluvo-aquic soil area of North China Plain.

Keywords: straw biochar; carbon-based fertilizer; ammonia emission flux; cumulative ammonia emission; ammonia emission factor; wheat yield

氮肥作为农业生产常用的基础肥料,因不合理施用带来的一系列生态环境问题日益突出。高氮肥投入没有获得产量的持续增加,反而造成氮肥利用率降低,大量氮肥以氨挥发、淋溶等方式损失^[1]。氨挥发是农田氮肥损失的重要途径之一,全球氮肥诱导的NH₃挥发量(以N计)已经从1961年的1.9 Tg·a⁻¹增加到2010年的16.7 Tg·a⁻¹^[2]。研究表明,我国每年农田施用氮肥和有机肥氮素的10%~30%以氨挥发形式损失^[3],在华北平原小麦-玉米轮作体系中,小麦季氨挥发损失量约占小麦季施氮总量的17.8%^[4]。农田过高的氨挥发不仅会降低作物氮肥利用率,还会导致大气污染和农业面源污染等一系列环境问题^[5]。

秸秆还田是被公认的一项既节约资源又环保的农业措施,在农业生产中采用秸秆直接还田的方式占比最高,然而,秸秆还田会促进农田氨挥发^[6-7],秸秆还田能提高土壤脲酶活性,促进尿素水解,从而增加氨挥发^[8]。为了减少秸秆还田引发的负面效应,秸秆生物炭及其应用技术研究逐渐形成且已经取得了较大进展^[9]。生物质炭主要是生物质材料在缺氧或绝氧条件下,经高温热解炭化后生成的含碳丰富的固体有机物质^[10]。生物质炭具有较大的比表面积以及附着在表面的含氧官能团,对NH₄⁺有较强的吸附性,能够降低NH₄⁺的有效性,从而对农田氨挥发起到很好地抑制作用^[11]。炭基肥是以生物炭为基质,添加化学肥料,通过掺混、包膜定型以及化学反应等方式制备而成^[12]。炭基肥得益于生物炭的性质,可减缓肥料中养分的释放速率,提高肥料利用率^[13]。已有研究表明,炭基肥具有改善土壤理化性质^[14]、降低土壤氮素流失风险^[15-16]、提高作物产量^[17]、改善作物品质^[18]等作用。

关于生物炭对农田氨挥发的影响主要分为两种观点。一些学者认为生物炭能够促进农田氨排放^[19-21],而也有研究表明生物炭能够有效降低农田氨

排放^[22-24]。现有研究多数集中在室内培养下对土壤氨挥发进行监测,也有少数田间生物炭短期试验。生物炭、土壤环境、作物三者紧密相连,生物炭影响农田土壤氨挥发试验必须在土壤-生物炭-作物系统下进行才更有说服力。另外,大田试验具有很多年度可变性,生物炭在农田中长期存在必然会发生自然风化和老化,自身理化性质也随之改变,对农田土壤系统的影响也随之改变。因此十分有必要开展长期连续性秸秆生物炭和炭基肥对农田生态系统的氨挥发影响的研究。本研究采用密闭海绵法,通过大田定位试验,探究了连续3年秸秆生物炭和炭基肥对华北平原小麦农田氨挥发的影响,明确秸秆生物炭和炭基肥对农田氨挥发的减排效果及小麦产量的影响,以期对农业废弃物安全资源化利用与减少该地区农业氨排放提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

本试验于河南省原阳县河南现代农业研究开发基地农业农村部原阳农业环境与耕地保育科学观测试验站开展,地理位置113°40' E, 34°47' N,属温带大陆性季风气候,地貌属于典型的黄河冲积平原。该试验站年平均光照时间为1 925.1 h,年平均温度为14.5℃,年平均降水量为573.3 mm,降水主要分布在6—8月。0~30 cm土层土壤pH为8.56,有效磷含量为11.1 mg·kg⁻¹,速效钾含量为150 mg·kg⁻¹,铵态氮含量为1.46 mg·kg⁻¹,硝态氮含量为12.0 mg·kg⁻¹,全氮含量为0.37 g·kg⁻¹,有机质含量为5.58 g·kg⁻¹。试验期间平均温度及降雨量如图1所示。

本研究共设4个处理,CK(对照处理,整个轮作周期内均不施肥,秸秆还田);CF(单施化肥+当季秸秆还田);BF(单施化肥+当季秸秆还田当量生物炭,

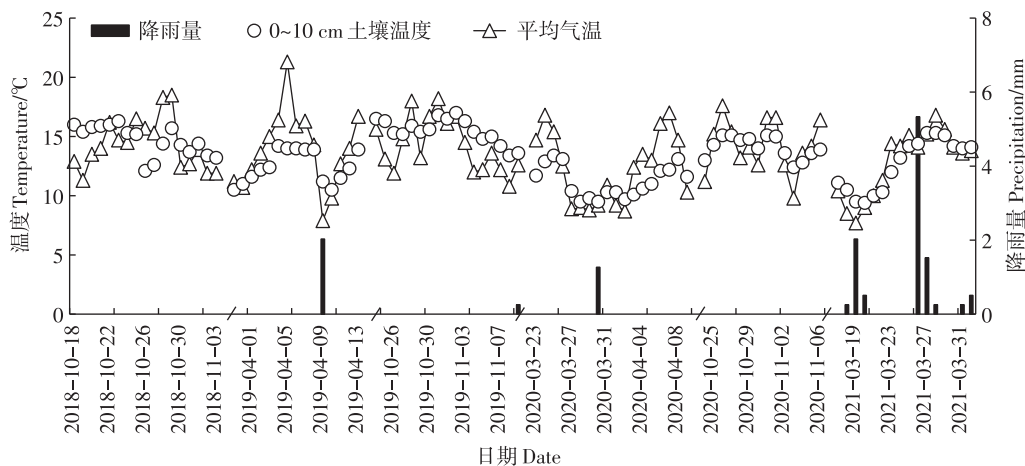


图1 降雨量、平均气温与0-10 cm土壤温度的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of rainfall, average temperature and 0-10 cm soil temperature

小麦季施用玉米秸秆生物炭,按秸秆量 9 000 kg·hm⁻² 及 1/3 转化率折合玉米秸秆生物炭 3 000 kg·hm⁻², 秸秆不还田);BBF(基肥以 15-15-10 玉米秸秆炭基复合肥替代,秸秆还田)。各施肥处理的 N、P₂O₅、K₂O 输入量相同(N: 225 kg·hm⁻²; P₂O₅: 90 kg·hm⁻²; K₂O: 60 kg·hm⁻²), 秸秆生物炭、炭基肥均在基肥期施入,养分不足的用化学肥料补足,追肥期氮肥施用种类均为尿素,氮肥基追比为 2:3。小麦基肥施肥方式为撒施翻耕,追肥施肥方式为撒施。各处理施肥情况如表 1 所示。

试验田轮作制度为冬小麦-夏玉米轮作,试验时间为 2018—2021 年小麦季,小麦品种为郑麦 369,10 月下旬播种,6 月初收获,行距为 25 cm,小麦施底肥时间为每年 10 月下旬,追肥时间为每年 3 月下旬至 4 月初。2018—2021 年小麦季共发生 6 次灌溉事件,灌溉时间分别为 2018 年 10 月 18 日、2019 年 3 月 31 日、2019 年 10 月 24 日、2020 年 3 月 24 日、2020 年 10 月 22 日、2021 年 3 月 17 日。本试验期间气象因子数据及土壤温度由农业农村部原阳农业环境与耕地保育科学观测试验站气象站监测得到。收获每个小区的籽

粒并于 60 °C 烘箱烘干至质量恒定计算小区小麦籽粒产量。供试玉米秸秆生物炭含 0.3% N、0.3% P₂O₅、0.4% K₂O, pH 值为 8.2; 供试炭基肥含 15% N、15% P₂O₅、10% K₂O, 含碳量为 11.4%。生物炭与炭基肥购自郑州永邦新能源设备技术有限公司。试验采用田间小区试验,微区长 8 m×宽 5 m=40 m², 每个处理设 3 个重复,随机排列。

试验采用密闭海绵法^[25], 吸收液为 PG-mix(磷酸-丙三醇混合溶液)混合液,即取 85% 磷酸溶液 400 mL 和 60 mL 丙三醇,并转移至 1 000 mL 容量瓶中,用去离子水定容至 1 000 mL。试验开始前,准备干净海绵并吸附 35 mL PG-mix 溶液。试验开始时,将含有吸附液的海绵安放到各自小区的氨挥发装置内,在施肥后第 2 天采集氨挥发样品,每次采集时间约为 48 h 以代表 2 d 的氨挥发量。每 2 d 采样一次,持续采样 8~9 次,直至海绵吸附的氨含量较低且处于稳定状态。采集的海绵重复清洗 4~5 次,确保海绵中的铵根离子完全进入清洗液中,用去离子水定容至 1 L,摇匀后用连续流动分析仪测定浸取液中的铵态氮浓度。

表 1 各处理施肥情况(kg·hm⁻²)

Table 1 Fertilization status of each treatment(kg·hm⁻²)

| 处理 Treatment | 尿素 Urea | | 过磷酸钙 Superphosphate | | 氯化钾 Potassium chloride | | 生物炭 Biochar | | 炭基肥 Biochar based fertilizer | |
|-----------------|----------------|-------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------------|-------------|
| | 基肥 | 追肥 | 基肥 | 追肥 | 基肥 | 追肥 | 基肥 | 追肥 | 基肥 | 追肥 |
| | Basal dressing | Topdressing | Basal dressing | Topdressing | Basal dressing | Topdressing | Basal dressing | Topdressing | Basal dressing | Topdressing |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CF | 195.7 | 293.4 | 562.5 | 0 | 150.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| BF | 195.7 | 293.4 | 562.5 | 0 | 150.0 | 0 | 3 000.0 | 0 | 0 | 0 |
| BBF | 0 | 293.4 | 0 | 0 | 50.0 | 0 | 0 | 0 | 600.0 | 0 |

1.2 土壤样品采集与测定

每2次氨气采集对应土壤样品采集1次,采用五点取样法用土钻采集表层(0~20 cm)土壤样品混合均匀,用于测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量,不能及时测定的土壤样品在4℃冰箱里贮存备测。土壤NH₄⁺-N与NO₃⁻-N含量采用2.0 mol·L⁻¹的氯化钾溶液浸提,振荡过滤后用流动注射分析仪(Seal AA3)分析测定,用于相关性分析。

1.3 氨挥发计算公式与数据处理

土壤氨挥发速率(F , kg·hm⁻²·d⁻¹,以N计,下同)的计算公式为:

$$F=C \times V \times 10\,000 / (T \times A) \times k \quad (1)$$

式中: C 为流动分析仪测定NH₃-N的浓度,mg·L⁻¹; V 为浸提体积,L; T 为累计时间,d; A 为圆形PVC管横截面积,m²; k 为NH₃与N的转换常数(0.82)。

$$P=F_1 \times D_1 + F_2 \times D_2 + F_3 \times D_3 + \dots + F_n \times D_n \quad (2)$$

式中: F_n 为第 n 次收集时土壤氨挥发速率; D_n 为第 n 次收集时间间隔上次的天数。

氨排放系数(%)=(施肥处理的氨挥发量-对照区的氨挥发量)/总施氮量×100 (3)

采用Excel 2010统计与分析试验数据制图,利用SPSS 17对数据进行基于LSD的显著性检验和相关性分析,用Excel 2010绘制图表。

2 结果与分析

2.1 各处理土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量的变化

小麦基肥期和追肥期,各施肥处理土壤铵态氮含量随着时间的推移逐渐降低(图2)。施基肥后,前期

CF处理的土壤铵态氮含量要显著高于BF与BBF处理,而后期低于BF与BBF处理。追肥后,前期各施肥处理土壤铵态氮含量无显著差异,后期BF与BBF处理土壤铵态氮含量高于CF。

小麦基肥期与追肥期,各施肥处理土壤硝态氮含量呈现先升高后降低的趋势(图3)。基肥期,施肥后第2天,各施肥处理土壤硝态氮含量无显著差异,2 d之后,BF与BBF土壤硝态氮含量高于CF。追肥期,BF与BBF处理的土壤硝态氮含量高于CF。

2.2 不同处理对小麦基肥期和追肥期农田氨挥发速率的影响

如图4所示,小麦季基肥期,CK处理氨挥发速率均处于较低水平,各施肥处理氨挥发速率整体均表现为先升高后降低的趋势,在施肥后的第4天达到了峰值,CF、BF、BBF处理的氨挥发速率峰值分别为2.34、1.67、1.66 kg·hm⁻²·d⁻¹,然后迅速降低,在施肥8 d之后降至较低水平。施肥后6 d内,除CK处理外,CF处理氨挥发速率最高,BBF处理为最低。

如图5所示,小麦季追肥期,施肥前各处理氨挥发速率均处于较低水平,施肥后第1~2天各处理氨挥发速率达到峰值,随后逐渐降低,直到施肥7 d之后各处理氨挥发速率降至施肥前水平。追肥期CK、CF、BF、BBF处理的氨挥发速率范围为0.01~0.53、0.02~1.49、0.02~1.24、0.02~1.37 kg·hm⁻²·d⁻¹。施肥后1~2 d,各施肥处理处于较高水平,CF处理的氨排放速率显著高于BF和BBF处理($P<0.05$)。

2.3 不同处理对氨累积排放量、氨排放系数及小麦产量的影响

方差分析表明,年份和处理对小麦季氨累积排放

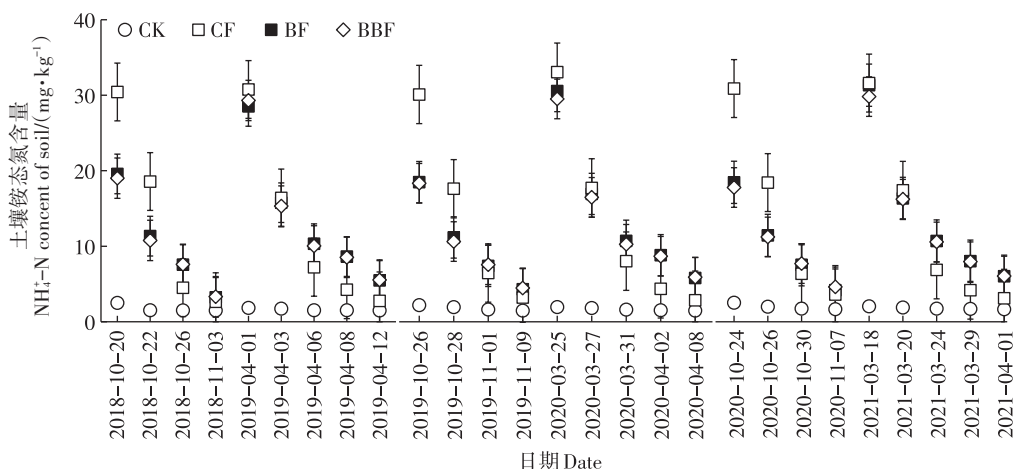


图2 2018—2021年监测周期内0~20 cm土壤NH₄⁺-N含量变化

Figure 2 Changes of NH₄⁺-N content in 0~20 cm soil during the fertilization period from 2018 to 2021

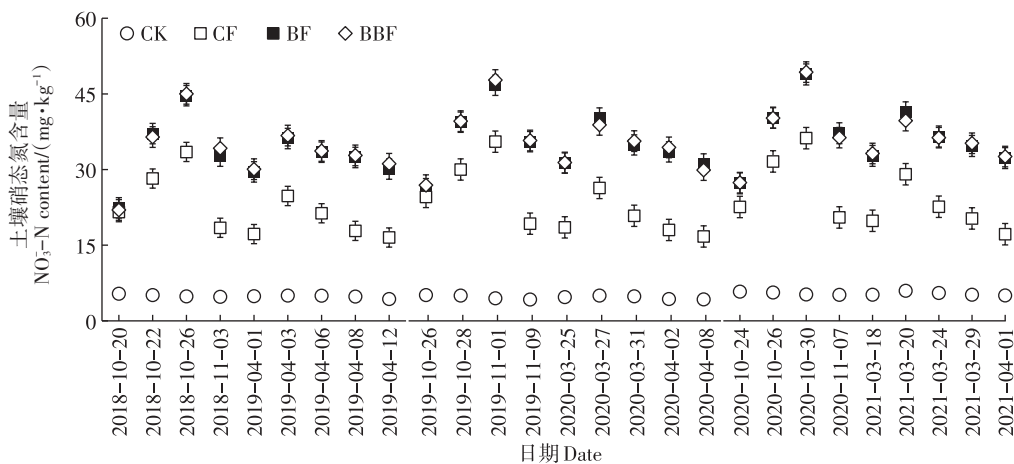


图3 2018—2021年监测周期内0~20 cm 土壤 NO₃-N 含量变化

Figure 3 Changes of NO₃-N content in 0-20 cm soil during the fertilization period from 2018 to 2021

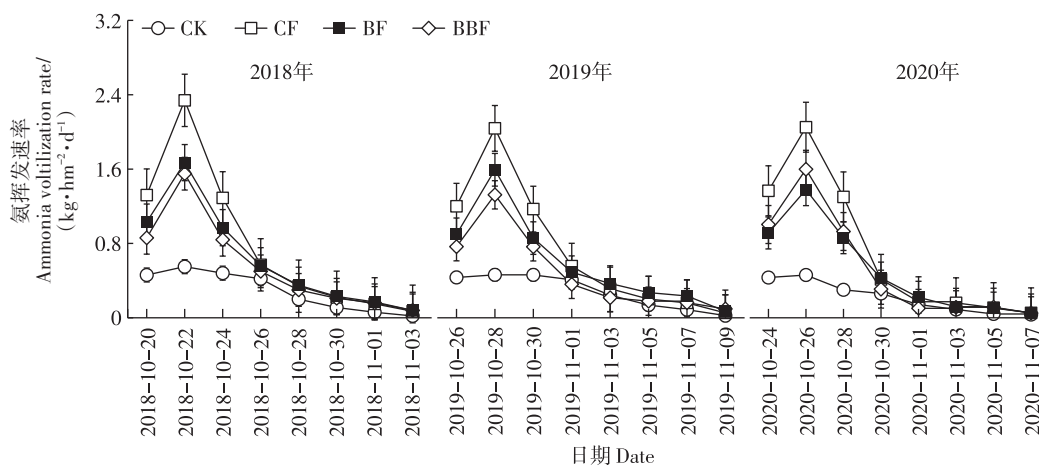


图4 2018—2021年小麦基肥期氨挥发速率变化

Figure 4 Changes in ammonia volatilization rate during wheat basal fertilizer period from 2018 to 2021

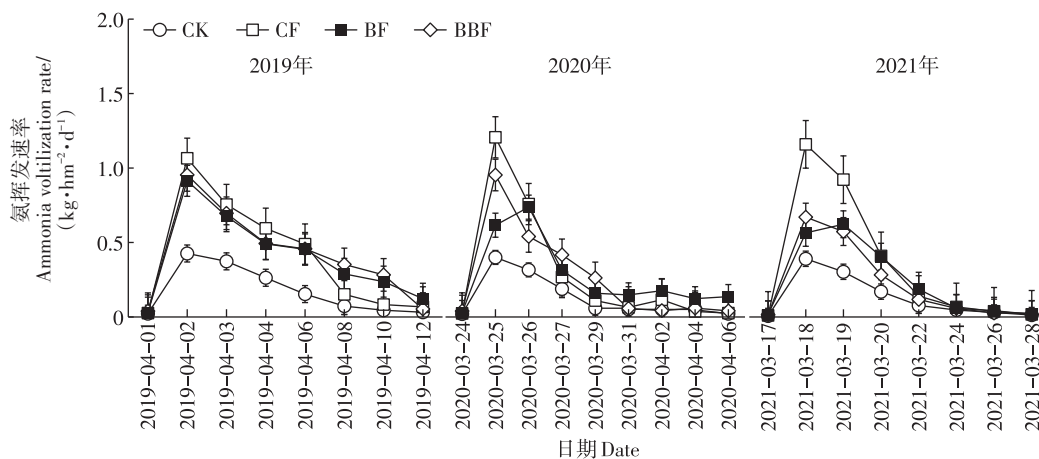


图5 2018—2021年小麦追肥期氨挥发速率变化

Figure 5 Changes in ammonia volatilization rate during wheat topdressing period from 2018 to 2021

量、小麦产量、单位产量氮排放量和氨排放系数的影响均极显著,年份×处理交互作用对小麦季氨累积排

放量、小麦产量和氨排放系数的影响均极显著,而对单位产量氨排放量无显著影响(表2)。各处理基肥

期的氨累积排放量显著高于追肥期,基肥期氨累积排放量占整个小麦季施肥期氨排放总量的70.74%~85.59%。各处理基肥期与追肥期的氨累积排放量(3年平均)大小顺序为CF>BF>BBF>CK,不施肥处理氨排放总量最低。基肥期CF处理氨累积排放量最高,显著高于其他处理($P<0.05$)。2018—2021年连续3年,小麦季BF处理的氨累积排放量比CF处理分别降低了19.6%、15.0%、27.3%,BBF处理比CF处理分别降低了25.9%、28.8%、27.0%。2018—2021年CK、CF、BF、BBF处理的平均年度氨累积排放量分别为5.72、15.28、12.11、11.11 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在所有施肥处理中,BBF处理最低,BBF处理平均年度氨累积排放量比CF和BF处理分别降低了27.3%和8.2%。

2018—2021年连续3年,小麦季氨排放系数范围分别为2.44%~4.32%、2.11%~3.99%、2.63%~4.44%(表2),其中CF处理显著高于BF与BBF处理($P<0.05$)。所有施肥处理中,BBF处理的氨排放系数最小。单位产量氨排放量可作为衡量农田环境效益与经济效益协同性的一项重要参考指标,在保证不减产的前提下,其值越低说明农田环境效益与经济效益协同性越好。2018—2021年,所有处理中,CK处理的单位产量氨排放量最低(1.06~1.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),其次是BBF

处理(1.50~2.11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2018—2021年,BF与BBF处理产量分别比CF处理增加了4.4%~8.4%与4.1%~13.2%。计算3年小麦平均籽粒产量,BBF处理分别比CF和BF处理增加了5.7%和1.1%。BBF处理小麦产量最高,其次是BF处理。

2.4 环境因子对土壤氨挥发的影响

2019—2020年,小麦施肥期土壤氨挥发速率与气温、0~10 cm土壤温度和土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著正相关(表3, $P<0.05$)。2018—2019年,土壤氨挥发速率与气温、0~10 cm土壤温度呈正相关,但未达到显著水平。在降雨量较大的2021年施肥期,土壤氨挥发速率与0~10 cm土壤温度和平均气温呈负相关,但未达到显著水平,与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著正相关($P<0.05$)。各处理氨挥发速率与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无明显相关性。

3 讨论

3.1 秸秆生物炭与炭基肥对小麦农田氨挥发影响

在小麦基肥期,各施肥处理的氨挥发速率均呈现先升高后降低至施肥前排放水平(施肥后第4天达到峰值)的排放规律,张水清等^[23]、吕金岭等^[25]在潮土氨

表2 2018—2021年小麦季氨累积排放量和排放系数

Table 2 Cumulative ammonia emission and ammonia emission factors during the wheat growing seasons from 2018 to 2021

| 年份 Period | 处理 Treatment | 氨累积排放量 Cumulative ammonia emissions/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ | | | 小麦籽粒产量 Wheat grain yield/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ | 单位产量氨排放量 Yield-scaled ammonia emission/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 氨排放系数 Ammonia emission factor/% |
|------------------------|-----------------|---|-------------------|--------------------|--|---|---------------------------------------|
| | | 基肥 Basal dressing | 追肥 Topdressing | 整季 Whole season | | | |
| 2018—2019 | CK | 4.60±0.43h | 1.90±0.06g | 6.50f | 4 311±141e | 1.51±0.06ef | — |
| | CF | 12.60±1.08a | 3.59±0.19a | 16.19a | 5 489±215d | 2.96±0.26a | 4.32±0.55a |
| | BF | 10.12±0.42c | 2.89±0.11d | 13.01c | 5 895±74cd | 2.21±0.09bc | 2.89±0.23cd |
| | BBF | 9.00±0.51de | 3.00±0.11cd | 12.00d | 5 717±189d | 2.11±0.25cd | 2.44±0.27e |
| 2019—2020 | CK | 4.28±0.29h | 1.45±0.09h | 5.73g | 4 684±178e | 1.23±0.11fg | — |
| | CF | 11.19±1.18b | 3.52±0.17a | 14.71b | 6 167±75bcd | 2.41±0.42b | 3.99±0.60b |
| | BF | 9.36±0.79d | 3.14±0.21c | 12.50cd | 6 684±108ab | 1.88±0.11d | 3.01±0.44c |
| | BBF | 7.51±0.57g | 2.96±0.16d | 10.47e | 6 978±119a | 1.50±0.11ef | 2.11±0.32f |
| 2020—2021 | CK | 3.47±0.39i | 1.44±0.22h | 4.91h | 4 611±104e | 1.06±0.08g | — |
| | CF | 11.58±0.68b | 3.32±0.23b | 14.90b | 6 578±148abc | 2.27±0.09bc | 4.44±0.40a |
| | BF | 8.33±1.13f | 2.50±0.13e | 10.83e | 6 867±200ab | 1.58±0.22e | 2.63±0.55de |
| | BBF | 8.62±0.45ef | 2.25±0.21f | 10.87e | 6 967±122a | 1.56±0.03e | 2.64±0.29de |
| 方差分析 Variance analysis | | | | | | | |
| 年份 | | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 处理 | | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| 年份×处理 | | ** | ** | ** | ** | ns | ** |

注:表中数据为平均值±标准误($n=3$);同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$);*表示影响显著($P<0.05$),**表示影响极显著($P<0.01$),ns表示未达到显著水平。

表3 氨挥发速率与各环境因子的相关性

Figure 3 Correlation between NH₃ emission rate and various environmental factors

| 年份 Period | 处理 Treatment | 平均气温 Average temperature | 0~10 cm 土壤温度 0-10 cm soil temperature | 土壤 NH ₄ -N Soil NH ₄ -N | 土壤 NO ₃ -N Soil NO ₃ -N |
|--------------|-----------------|-----------------------------|--|--|--|
| 2018—2019 | CK | 0.078 | 0.231 | 0.301 | 0.218 |
| | CF | 0.582 | 0.418 | 0.751* | -0.025 |
| | BF | 0.029 | 0.385 | 0.617 | -0.051 |
| | BBF | 0.011 | 0.307 | 0.664 | -0.121 |
| 2019—2020 | CK | 0.624* | 0.641* | 0.809* | 0.601 |
| | CF | 0.587* | 0.681* | 0.760* | 0.123 |
| | BF | 0.591* | 0.646* | 0.823* | 0.071 |
| | BBF | 0.554* | 0.641* | 0.587 | 0.006 |
| 2020—2021 | CK | -0.294 | -0.191 | 0.801* | 0.449 |
| | CF | -0.107 | -0.035 | 0.761* | 0.347 |
| | BF | -0.079 | -0.025 | 0.755* | 0.024 |
| | BBF | -0.026 | -0.031 | 0.704* | -0.060 |

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。

挥发的研究中也得到了相同的氨排放规律,这是由于氮肥伴随水分进入石灰性土壤后,在脲酶的作用下迅速发生水解,产生氨气^[26],导致施肥初期氨挥发表现出较高水平,随着氮素的挥发与转化,氨挥发速率逐渐降低。在小麦追肥期,追肥后各处理的氨挥发呈现逐渐降低的变化规律,与基肥期的氨挥发规律有所不同,这可能与施肥方式有关,基肥施肥方式是将肥料与0~20 cm土壤混合,属于优化施肥方式^[27],氮肥与土壤混合后被土壤吸附,活动范围减小,从而抑制氨挥发^[28];追肥施肥方式为撒施,撒施大大减弱了土壤对NH₄⁺的吸附作用,从而呈现出追肥期氨挥发速率逐渐减低的变化规律。施生物炭与炭基肥处理的氨排放通量显著低于单施化肥处理($P<0.05$),表明生物炭能够显著降低氨挥发,这与前人的研究结果^[22-23,29]一致,生物炭能够有效吸附多种离子,尤其是对土壤NH₄⁺有较强的吸附作用,通过对土壤NH₄⁺的吸附,生物炭可以加强对土壤氮素的固持,起到“深施”的效果^[30],深施会降低土壤的氨挥发损失^[31]。本研究结果表明,2019—2020年小麦施肥期氨挥发速率与0~10 cm土壤温度和土壤NH₄⁺-N含量呈显著正相关,一方面土壤温度增加致使土壤脲酶活性增强,从而加速尿素分解,最终导致氨挥发速率增高^[32];另一方面温度升高加快NH₄⁺向NH₃的转化过程^[33]。

本研究中,氨挥发损失主要发生在基肥期,累积排放量占整个小麦季施肥期的70.74%~85.59%,倪康等^[34]在研究小麦季氨挥发的长期定位试验中也得到了相同的结论,这可能是由于基肥期小麦还处于萌芽

期,对养分的需求较低,氮肥在土壤中发生水解,一部分通过化学作用由铵态氮转化为其他形式的氮,而一部分通过氨挥发的形式排放在大气中^[35]。施加生物炭能提高土壤碳氮比,限制土壤微生物的氮素转化和反硝化,对土壤NH₄⁺和NO₃⁻具有显著的持留作用^[36],从而降低氨挥发水平。在连续3年的试验中,BF处理与BBF处理整个小麦季的氨累积排放量均显著低于CF处理,说明生物炭能够显著减少小麦季农田的氨挥发损失,这与廖霞等^[22]、王朝旭等^[24]的研究结果相一致。连续3年的研究结果显示,BF处理的氨累积排放量比CF处理分别降低了19.6%、15.0%、27.3%,BBF分别降低了25.9%、28.8.0%、27.0%,炭基肥的减排效果要略优于生物炭,这是由于生物炭基肥既秉承了生物炭可以改良土壤、改善土壤环境的优点,又有其特殊之处,它可使肥料养分缓慢释放^[37]。本试验条件下,各处理的氨排放系数范围为2.11%~4.44%,与相同测定方法条件下吕金岭等^[25]的研究结果相近(3.3%~5.0%),低于相同土壤类型和施氮水平条件下曹兵等^[38](5.0%)、廖霞等^[22](3.68%~9.45%)的研究结果,一方面可能由于本研究采用海绵吸收法收集测定氨气,结果偏低;另一方面施肥种类不同也会对氨排放系数造成影响,生物炭与化肥配施降低了氨累积挥发量,从而降低了氨排放系数。

3.2 秸秆生物炭与炭基肥对小麦产量的影响

连续3年研究结果显示,BF处理小麦产量比CF处理增加4.4%~8.4%,BBF处理增产4.1%~13.2%,表明生物炭和炭基肥能够提高小麦产量。施用生物炭

可提高作物对氮、磷、钾等元素的吸收^[39],减少养分流失,提高肥料利用率,从而提高作物产量。张水清等^[40]、刘杰云等^[41]的研究结果得出,添加12.5~25.0 t·hm⁻²的生物炭并没有显著提高冬小麦产量,而李中阳等^[42]在相同土壤类型的试验农田中添加20~60 t·hm⁻²的生物炭,冬小麦产量增加1.0%~5.9%。由此可见,生物炭对小麦产量的影响与生物炭的施用量有关。本试验中,替代量为3 t·hm⁻²,与前者研究结果不一致,可能是由于生物炭的替代方式不同,张水清^[40]、刘杰云等^[41]与李中阳等^[42]的试验处理为秸秆还田前提下添加生物炭,而本试验中生物炭为当量秸秆生物炭替代秸秆还田。刘宇娟等^[43]在当量秸秆生物炭替代秸秆还田条件下,施用2.25~11.25 t·hm⁻²的生物炭,冬小麦产量增加4.9%~7.3%,增幅与本研究结果接近,可见,生物炭替代的方式不同对小麦产量的影响结果也存在差异。生物炭的施用年限对小麦产量也存在一定的影响,刘宇娟等^[43]对短期与长期连续施生物炭的研究发现,生物炭施用第1年的小麦产量与不施生物炭处理没有显著差异,连续9年施生物炭显著提高了小麦产量,在生物炭为2.25 t·hm⁻²水平下小麦增产24.5%。本研究结果表明,连续3年BF处理小麦产量与CK处理相比,分别增加了7.4%、8.4%和4.4%,BBF处理分别增加了4.1%、13.2%和5.9%。BF与BBF处理的小麦增产效果随着施用年限的增加,呈现逐年增加的趋势。第3年增产效果下降的原因可能是CF处理小麦产量相比于前两年,达到了较高水平,分析认为该年度(2021年)3—4月降雨量较多,充足的降雨量增加了土壤田间持水量,开花期至成熟期阶段耗水量增加,延缓开花后叶片衰老,调节籽粒内源激素平衡,促进光合同化物向籽粒的积累与转运,从而增加小麦产量^[44]。本研究为连续3年的定位试验,年限相对较短,关于生物炭施用年限对小麦产量的影响尚需今后持续的长期定位试验进一步明确。

4 结论

(1)连续3年的试验结果表明,与单施化肥处理相比,秸秆生物炭能够降低小麦农田15.0%~27.3%的氨排放,增产4.4%~8.4%;炭基肥可降低小麦农田25.9%~28.8%的氨排放,增产4.1%~13.2%。秸秆生物炭和炭基肥均能在保证作物产量的前提下,显著降低农田氨挥发。

(2)施秸秆生物炭与施炭基肥处理相比,施炭基

肥处理的氨减排与增产效果最佳,可作为华北平原潮土区农业氨减排及小麦增产的新型施肥技术模式进行推广。

参考文献:

- [1] XU P, ZHANG Y S, GONG W W, et al. An inventory of the emission of ammonia from agricultural fertilizer application in China for 2010 and its high-resolution spatial distribution[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115: 141-148.
- [2] XU R T, TIAN H Q, PAN S F, et al. Global ammonia emissions from synthetic nitrogen fertilizer applications in agricultural systems: empirical and process-based estimates and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 314-326.
- [3] BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Estimation of global NH₃ volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(2): 8-18-14.
- [4] 裴宏伟, 沈彦俊, 刘昌明. 华北平原典型农田氮素与水分循环[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 283-296. PEI H W, SHEN Y J, LIU C M. Nitrogen and water cycling of typical cropland in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 283-296.
- [5] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China: contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2): 117-127.
- [6] SUN L Y, WU Z, MA Y C, et al. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 181: 97-105.
- [7] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 27-33. WANG J, WANG D J, ZHANG G, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake Region[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 27-33.
- [8] WANG J, WANG D J, ZHANG G, et al. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(1): 73-84.
- [9] 潘根兴, 林振衡, 李恋卿, 等. 试论我国农业和农村有机废弃物生物质碳产业化[J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(1): 75-82. PAN G X, LIN Z H, LI L Q, et al. Perspective on biomass carbon industrialization of organic waste from agriculture and rural areas in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1): 75-82.
- [10] SOHI S P, KRULL E, LOPEZ-CAPEL E, et al. A review of biochar and its use and function in soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 105: 47-82.
- [11] MANDAL S, THANGARAJAN R, BOLAN N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 120-127.

- [12] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 等. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 886-897. ZHAO Z Z, WANG X L, LI H B, et al. Slow-release property and soil remediation mechanism of biochar-based fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 886-897.
- [13] 李昌娟, 杨文浩, 周碧青, 等. 生物炭基肥对酸化茶园土壤养分及茶叶产量的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 387-397. LI C J, YANG W H, ZHOU B Q, et al. Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients, tea output and quality in an acidified tea field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2): 387-397.
- [14] 杨劲峰, 江彤, 韩晓日, 等. 连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 68-73. YANG J F, JIANG T, HAN X R, et al. Effects of continuous application of biochar-based fertilizer on soil characters and yield under peanuts continuous cropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3): 68-73.
- [15] 陈蕾, 高山雪, ZHOU G. 施加炭基缓释肥对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 53-57. CHEN L, GAO S X, ZHOU G. Effects of application of slow release fertilizer coated with biochar on the nitrogen loss in soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 53-57.
- [16] 董达, 王宇婕, 姜培坤, 等. 炭基肥和竹炭对土壤氮素淋失和微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 144-151. DONG D, WANG Y J, JIANG P K, et al. Effects of carbon based fertilizer and bamboo charcoal on soil nitrogen loss and microorganism[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 144-151.
- [17] 张云舒, 唐光木, 蒲胜海, 等. 减氮配施炭基肥对棉田土壤养分、氮素利用率及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1372-1377. ZHANG Y S, TANG G M, PU S H, et al. Effect of biochar-based compound fertilizer on soil nutrients and cotton yield in irrigated sandy soil under nitrogen reduction condition[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(9): 1372-1377.
- [18] 张雪莲, 廖洪, 李昌伟, 等. 田间条件下生物炭与化肥配施对土壤氮磷纵向迁移、结球生菜产量品质及土壤微生物数量的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 21-28. ZHANG X L, LIAO H, LI C W, et al. Effects of simultaneous application of biochar and chemical fertilizer on the vertical migration of nitrogen and phosphorus, lettuce yield and quality and soil microbial quantity under field conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 21-28.
- [19] FENG Y F, SUN H J, XUE L H, et al. Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH₃ volatilization dramatically in rice paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1277-1284.
- [20] 赵进, 赵旭, 王慎强, 等. 长期秸秆黑炭施加对石灰性潮土肥力、固碳及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 176-184. ZHAO J, ZHAO X, WANG S Q, et al. Effects of successive incorporation of rice straw biochar into an alkaline soil on soil fertility, carbon sequestration and ammonia volatilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 176-184.
- [21] 刘遵奇, 孟军, 陈温福. 玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1142-1148. LIU Z Q, MENG J, CHEN W F. Effect of corn stalk biochar on urea hydrolysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6): 1142-1148.
- [22] 廖霞, 刘德燕, 陈增明, 等. 田间老化生物质炭对潮土氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1326-1336. LIAO X, LIU D Y, CHEN Z M, et al. Effects of field-aged biochar on NH₃ emissions under wheat-maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1326-1336.
- [23] 张水清, 张博, 岳克, 等. 生物质炭对华北平原4种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 127-134. ZHANG S Q, ZHANG B, YUE K, et al. Effects of biochar on NH₃ volatilization from four typical soils during early growth stage of winter wheat in the North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 127-134.
- [24] 王朝旭, 陈绍荣, 张峰, 等. 玉米秸秆生物炭及其老化对石灰性农田土壤氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2350-2358. WANG C X, CHEN S R, ZHANG F, et al. Effects of fresh and aged maize straw-derived biochars on ammonia volatilization in a calcareous arable soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2350-2358.
- [25] 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.
- [26] 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 等. 生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 467-476. YANG W N, DENG Z X, LI J, et al. Effect of biochar and chemical fertilizer mixture on ammonia volatilization and phosphorus fixation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 467-476.
- [27] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 263-269. DENG M H, YIN B, ZHANG S L, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 263-269.
- [28] 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. Soil ammonia volatilization under the different fertilization in summer corn farmland in north China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(11): 137-142.
- [29] 王一宇, 王圣森, 戴九兰. 生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3738-3745. WANG Y Y, WANG S S, DAI J L. Effect of biochar on ammonia volatilization in saline-alkali soil[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3738-3745.
- [30] CHEN C R, PHILLIPS I R, CONDRON L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1): 301-312.
- [31] 胡瞞瞞, 董文旭, 王文岩, 等. 华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1880-1889. HU M M, DONG W X, WANG W Y, et al. The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat / summer maize rotation

- system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2020, 28(12): 1880-1889.
- [32] ZHANG Y S, LUAN S J, CHEN L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 480-493.
- [33] 许云翔, 何莉莉, 陈金媛, 等. 生物炭对农田土壤氨挥发的影响机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4312-4320. XU Y X, HE L L, CHEN J Y, et al. Effects of biochar on ammonia volatilization from farmland soil: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4312-4320.
- [34] 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. Ammonia volatilization from soil as affected by long-term application of organic manure and chemical fertilizers during wheat growing season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2614-2622.
- [35] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 小麦苗期施入氮肥在土壤不同氮库的分配和去向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 259-264. JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Distribution and fate of nitrogen fertilizer in various soil nitrogen pool at wheat seedling stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(3): 259-264.
- [36] AUGUSTENBORG C A, HEPP S, KAMMANN C, et al. Biochar and earthworm effects on soil nitrous oxide and carbon dioxide emissions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1203-1209.
- [37] 魏春辉, 任奕林, 刘峰, 等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(3): 14-19. WEI C H, REN Y L, LIU F, et al. Research progress of application of biochar and biochar -based fertilizer in agriculture[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(3): 14-19.
- [38] 曹兵, 高玮, 李洪杰, 等. 控释掺混肥对小麦-玉米轮作体系产量、氮肥利用效率及氨挥发的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(5): 873-885. CAO B, GAO W, LI H J, et al. Effects of blended application of coated and common urea on yield, nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(5): 873-885.
- [39] 刘美玲, 刘悦, 陈婷婷, 等. 水稻秸秆生物炭对江汉平原麦区小麦养分吸收和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(15): 7-13. LIU M L, LIU Y, CHEN T T, et al. Rice straw biochar: effects on nutrient absorption and yield of wheat in Jianghan Plain[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(15): 7-13.
- [40] 张水清, 张博, 岳克, 等. 生物炭对潮土氨挥发及小麦氮素吸收的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(11): 2258-2267. ZHANG S Q, ZHANG B, YUE K, et al. Effect of biochar on ammonia volatilization and nitrogen uptake in wheat cultivated fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(11): 2258-2267.
- [41] 刘杰云, 邱虎森, 张文正, 等. 灌溉方式及生物炭对冬小麦产量及水肥利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(6): 59-65. LIU J Y, QIU H S, ZHANG W Z, et al. The effects of irrigation and biochar amendment on yield and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6): 59-65.
- [42] 李中阳, 齐学斌, 樊向阳, 等. 生物质炭对冬小麦产量、水分利用效率及根系形态的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 119-124. LI Z Y, QI X B, FAN X Y, et al. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 119-124.
- [43] 刘宇娟, 谢迎新, 董成, 等. 秸秆生物炭对潮土区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(3): 232-238. LIU Y J, XIE Y X, DONG C, et al. Effects of straw biochar application on grain yield of wheat and physicochemical properties in fluvo-aquatic soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(3): 232-238.
- [44] 张振, 张永丽, 石玉, 等. 灌溉量对冬小麦耗水量、旗叶衰老及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3): 393-402. ZHANG Z, ZHANG Y L, SHI Y, et al. Effects of irrigation amount on water-use efficiency, flag leaf senescence, and grain yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 393-402.