

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

引用本文:

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 等. 生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1623–1632.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响

尹爱经, 薛利红, 杨林章, 段婧婧, 侯朋福

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 768–776 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1472>

沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究

杨润, 孙钦平, 赵海燕, 邹国元, 刘本生, 李恋卿

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1566–1572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1617>

不同表面分子膜材料抑制稻田氨挥发的效果及其作用途径

王梦凡, 俞映惊, 杨根, 谢斐, 侯朋福, 杨林章, 薛利红, 孙庆业

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1685–1695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0657>

洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴凡, 张克强, 谢坤, 王风, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1735–1742 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1621>

水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望

周胜, 张鲜鲜, 王从, 孙会峰, 张继宁

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 852–862 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0060>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 等. 生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1623–1632.

LI Meng-yao, WANG Xu-gang, XU Xiao-feng, et al. Effects of treated domestic sewage irrigation on ammonia volatilization in straw-returning paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1623–1632.



开放科学 OSID

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶^{1,2}, 王旭刚¹, 徐晓峰¹, 段婧婧², 薛利红^{2,3*}, 杨林章^{2,3}

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000; 2. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏省食品质量安全重点实验室, 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 3. 江苏滩涂生物农业协同创新中心, 盐城师范学院, 江苏 盐城 224002)

摘要:通过土柱模拟实验,研究了生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田田面水氮素转化、氨挥发排放以及水稻产量的影响。结果表明:生活污水尾水灌溉显著提高了稻田田面水 NO_3^- -N 浓度和田面水 pH,并显著提高了产量、植株吸氮量和土壤脲酶活性。与清水灌溉处理相比,不施氮肥时生活污水尾水灌溉可使秸秆还田稻田氨挥发累积排放量显著降低 35%;正常施氮时生活污水尾水灌溉增加了秸秆还田稻田氨挥发排放总量,但由于显著增加了水稻产量,因此单位产量氨挥发排放量有所降低。由此可见,秸秆还田稻田利用生活污水尾水灌溉,不仅可消纳净化生活污水、替代部分氮肥,还可增加水稻产量、降低单位产量稻田氨挥发排放。

关键词:氨挥发;秸秆还田;稻田;氮吸收;生活污水尾水灌溉;pH

中图分类号:X799.3;X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)07-1623-10 doi:10.11654/jaes.2020-0084

Effects of treated domestic sewage irrigation on ammonia volatilization in straw-returning paddy fields

LI Meng-yao^{1,2}, WANG Xu-gang¹, XU Xiao-feng¹, DUAN Jing-jing², XUE Li-hong^{2,3*}, YANG Lin-zhang^{2,3}

(1. College of Agricultural, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Key Laboratory of Food Quality and Safety in Jiangsu, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Mudflat Collaborative Innovation Center of Biological Agriculture, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: In this study, a soil column monitoring experiment was conducted to assess the effects of treated domestic sewage irrigation on floodwater ammonium (NH_4^+ -N) and nitrate nitrogen (NO_3^- -N) concentrations, ammonia volatilization (NH_3), and paddy yields in straw-returning paddy fields. Treated domestic sewage significantly improved the NO_3^- -N concentration and the pH of floodwater, and also significantly improved the rice yields, plants nitrogen uptake, and soil urease activity. Compared with tap water irrigation, treated domestic sewage irrigation significantly decreased the cumulative NH_3 emission by 35% without nitrogen fertilizer application; while it increased the cumulative NH_3 emission when nitrogen fertilizer was applied with the same N input. The yield-scale NH_3 volatilization losses were decreased with the use of treated domestic sewage irrigation due to the improved yield. Thus, treated domestic sewage irrigation in straw-returning paddy fields can not only reuse and purify wastewater, partially replace nitrogen fertilizer use, increase paddy yields, but also reduce the yield-scale NH_3 volatilization losses, which is promising for rice production and environmental emission.

Keywords: ammonia volatilization; straw-returning; paddy fields; nitrogen uptake; treated domestic sewage irrigation; pH

收稿日期:2020-01-19 录用日期:2020-03-13

作者简介:李梦瑶(1999—),女,河南许昌人,硕士研究生,主要从事农业生态环境研究。E-mail:limengyaoyyyy@163.com

*通信作者:薛利红 E-mail:njxuelihong@gmail.com

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202004);国家自然科学基金项目(41877087,41501324)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of Water Pollution Control and Treatment (2017ZX07202004); The National Natural Science Foundation of China (41877087, 41501324)

氨挥发是稻田氮素的主要气态损失途径^[1],每年因氨挥发损失的氮素占稻田施氮量的9%~40%^[2]。氨挥发不仅降低了氮素利用率,其所导致的氮沉降还会使土壤硝酸盐浸出率增高,从而增加水体富营养化和土壤酸化风险^[3]。太湖流域为主要的稻麦轮作地区,该区域麦秸几乎全量还田。秸秆还田作为一种改良土壤结构、培肥地力常用的耕作措施,由于其腐解过程中有机酸等的累积及高碳氮比秸秆造成的固氮效应^[4],也导致了僵苗、幼苗毒害及水稻幼苗生长不良等现象的发生^[5]。此外,秸秆还田可增加土壤脲酶活性,促进尿素的水解,使田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加,导致稻田氨挥发排放增加,与秸秆不还田相比,秸秆还田增加氨挥发18.2%^[6]。

水资源短缺是目前最为严峻的全球环境问题之一,其中农业用水又是水资源重要消耗源之一^[7]。我国2017年农业用水量为 $3.8 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占总用水量的62.32%,但仍有大于 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的需水缺口^[8]。作为一种废弃资源,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的生活污水尾水中,仍含有丰富的氮、磷、可溶性有机质等易被作物吸收利用的养分^[9],将其作为灌溉水源,具有成本低、资源丰富及稳定的优点,且不受区域限制,已成为世界范围内解决农业用水紧张和水资源短缺的普遍方法^[10]。生活污水中丰富的无机氮能为作物提供养分,生活污水灌溉可以提高土壤反硝化细菌和纤维素分解菌的数量^[11],其中纤维素分解菌在促进秸秆腐解过程中起着关键作用,从而缓解因秸秆还田后土壤氮素固持所造成的负面影响。尹爱经等^[12]研究发现来自化粪池的生活污水(以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主)灌溉稻田可降低田面水TN浓度;da Fonseca等^[13]的研究表明,污水灌溉还增加了土壤氮素含量,从而减少农田氮素的地表径流损失风险。徐珊珊等^[14]研究表明,秸秆还田可提高田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,而耦合化粪池污水灌溉可降低田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,减少稻田氨挥发28%。达标排放的生活污水尾水中所含氮源主要为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发是否有同样的减排效果,目前还不清楚。本文通过盆栽模拟实验,考察生活污水尾水灌溉对稻田氨挥发排放的影响,以为生活污水尾水的稻田合理利用提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验概况

水稻盆栽实验于2018—2019年在江苏省农业科

学院实验大棚中进行。供试水稻品种为南粳46号。供试土壤为典型的水稻土,取自于宜兴的稻田,基本理化性质为:总氮 $1.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总磷 $0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $23.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $159.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机质 $29.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 5.90。盆钵直径30 cm,高50 cm,装入35 kg的水稻土,每盆栽种3穴,每穴3株。生活污水尾水取自南京某污水处理厂出水口,该污水处理厂主要采用 A^2/O 处理工艺,尾水基本理化性质为:总氮 $9.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、铵态氮 $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、硝态氮 $6.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 9.85。

1.2 试验设计

试验设置6个处理:秸秆不还田+清水灌溉+不施氮肥处理(TN0),秸秆不还田+清水灌溉+施氮肥处理(TN1),秸秆还田+清水灌溉+不施氮肥处理(STN0),秸秆还田+清水灌溉+施氮肥处理(STN1),秸秆还田+生活污水尾水灌溉+不施氮肥处理(SWN0),秸秆还田+生活污水尾水灌溉+施氮肥处理(SWN1)。每个处理设3次重复。

除不施氮肥处理外,其他处理保证稻季总氮投入一致,为 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮肥所用肥料为尿素,清水灌溉处理按照基肥:蘖肥:穗肥=3:3:4的比例分别施入。生活污水尾水灌溉处理基肥氮施加量与清水灌溉处理一致,蘖肥和穗肥的实际尿素施用量需扣除尾水灌溉带入的氮量。每次灌溉之前测定尾水中氮浓度,根据灌溉用量计算生活污水灌溉带入的氮,据此确定追肥时尿素的具体用量。各处理氮素具体带入情况见表1。所有处理磷钾肥用量一致,按 P_2O_5 $65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作底肥一次性施入,磷肥所用肥料为过磷酸钙,施加量为每盆3.28 g,钾肥所用肥料为氯化钾,施加量为每盆1.12 g。秸秆还田量按小麦产量 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,收获指数0.35计算,还田量约 $9450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。经折算,每盆还田秸秆66.76 g,秸秆粉碎后拌入土壤。水分管理为蘖肥期结束后(水稻分蘖期与拔节期之间)进行晒田,其余时间均保持2~5 cm水层的淹水状态。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 氨挥发测定

氨挥发采用密闭式间隔通气法-硼酸吸收法收集测定。每次施肥后7 d内连续每日测定。氨挥发每日的采集时间为8:00—10:00和13:00—15:00两个时段共4 h,通过 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 滴定硼酸得到氨挥发日排放通量,氨挥发累积排放量为氨挥发日排放量之和。

表 1 各处理氮素带入情况(kg·hm⁻²)
Table 1 Nitrogen application of each treatment(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	基肥期 Basel fertilizer		蘖肥期 Tiller fertilizer		穗肥期 Panicle fertilizer		总施氮量 Total N
	化肥带入氮 Fertilizer N	污水带入氮 Sewage N	化肥带入氮 Fertilizer N	污水带入氮 Sewage N	化肥带入氮 Fertilizer N	污水带入氮 Sewage N	
TN0	0	0	0	0	0	0	0
TN1	72	0	72	0	96	0	240
STN0	0	0	0	0	0	0	0
STN1	72	0	72	0	96	0	240
SWN0	0	6	0	12	0	8	26
SWN1	72	6	66	12	76	8	240

1.3.2 田面水 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 pH 的测定

田面水水样分别在施肥后一周内,每日下午 17:00—18:00 用 50 mL 塑料瓶采取稻田田面水并过滤,用荷兰 SKALAR SAN⁺⁺ SYSTEM 测试水样 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N。田面水 pH 使用 pH3310SET2(德国)原位测定。

1.3.3 植株及土壤样品的测定

水稻于成熟后收割地上部分,将水稻籽粒与茎秆分开,烘干至恒质量后测定产量。测产后粉碎水稻籽粒和秸秆,用凯式定氮法测定植株总氮含量^[15]。于水稻蘖肥期结束后采用三点取样法收集 0~20 cm 盆栽

土壤样品,样品采集后直接用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性^[16]。

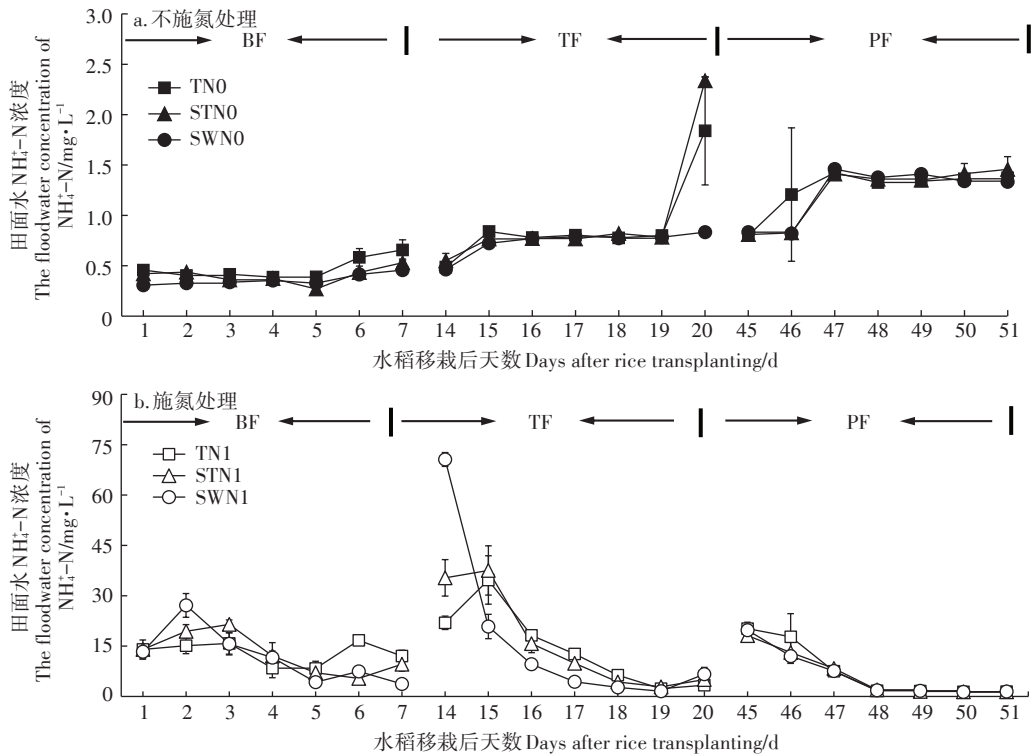
1.4 数据分析与处理

使用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件对数据进行分析 and 处理。采用 Excel 2007 进行图表绘制。采用 Duncan 法进行差异性比较。

2 结果与分析

2.1 田面水 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 动态变化

各处理的田面水 NH₄⁺-N 浓度变化情况见图 1。



BF、TF 和 PF 分别表示为水稻基肥期、蘖肥期和穗肥期。误差线表示 3 个重复间的 SD 值(n=3)。下同
BF, TF and PF were represented for base fertilizer stage, tiller fertilizer stage and panicle fertilizer stage of rice, respectively. The error bars represents the SD value between three replicates(n=3). The same below

图 1 不同处理田面水 NH₄⁺-N 动态变化

Figure 1 Dynamics of NH₄⁺-N concentrations in floodwater under different treatments

不施氮肥各处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均保持在较低水平, TN0 处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在水稻移栽后逐渐升高, 第 20 d 时达到最高峰值, 而 SWN0 处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度始终保持平稳状态, 水稻移栽后 20 d 的田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 SWN0 处理比 STN0 处理降低了 $1.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 降幅为 64%。施加氮肥的各处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均显著高于不施氮肥处理, 且均在施肥后 1~3 d 达到峰值。蘖肥期田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度(表 2)和峰值明显高于基肥期和穗肥期, 与 TN1 处理相比, SWN1 处理在基肥期显著降低了田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度, 但在蘖肥期显著提高了田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度, 且田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值比 STN1 处理提高了 $35.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由图 2 可以看出, 田面水中氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度总体较低, 不超过 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不施氮肥下清水灌溉处理(TN0 和 STN0)田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均在水稻移栽 1 d 后达到最高峰值, 随后在水稻移栽 4 d 后降至最低, 与 TN0 处理相比, STN0 处理可使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度峰值降低 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 降幅为 35%。 SWN0 处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在水稻移栽后 18、20、47 d 出现峰值, 分别高于 STN0 处理 1.85、3.97、0.99 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氮肥施用显著提高了秸秆还田清水灌溉处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度(表 3)。与秸秆还田清水灌溉处理相比, SWN0 和 SWN1 处理均显著提高了田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均值, 其中 STN0 处理 3 个肥期均达显著水平, STN1 处理在分蘖期达到显著水平并高出 STN1 处理 2.68 倍(表 3)。

表 2 不同处理下不同肥期田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 Average $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in floodwater in different fertilizer stage of different treatments($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	基肥期 Basal fertilizer	蘖肥期 Tiller fertilizer	穗肥期 Panicle fertilizer	均值 Average
TN0	0.47±0.01c	0.90±0.05c	1.26±0.06b	0.88±0.01b
STN0	0.40±0.00c	0.97±0.01c	1.23±0.02b	0.87±0.00b
SWN0	0.36±0.00c	0.73±0.00c	1.22±0.78b	0.77±0.00b
TN1	12.92±0.51a	14.21±0.51b	7.37±0.78a	11.50±0.44a
STN1	12.71±0.47ab	15.82±1.02a	6.54±0.31a	11.69±0.43a
SWN1	11.88±0.33b	16.22±0.52a	6.52±0.30a	11.67±0.08a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

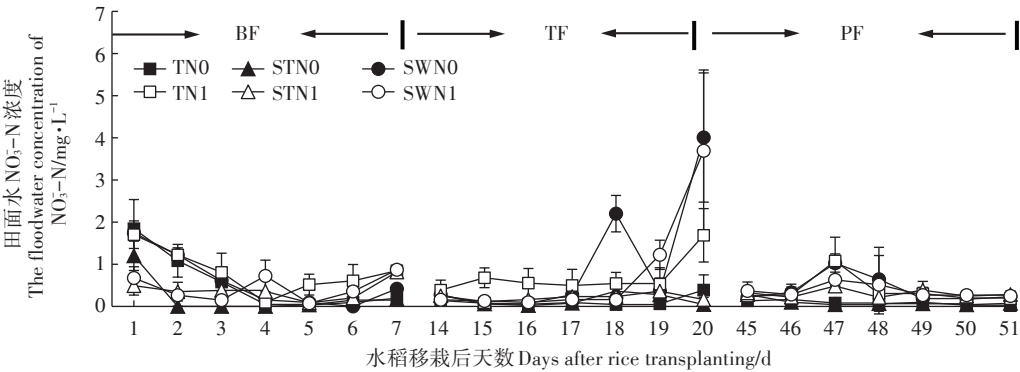


图 2 不同处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度动态变化

Figure 2 Dynamics of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations in floodwater under different treatments

表 3 不同处理下不同肥期田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 3 Average $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration in floodwater in different fertilizer stage of different treatments($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

处理 Treatments	基肥期 Basal fertilizer	蘖肥期 Tiller fertilizer	穗肥期 Panicle fertilizer	均值 Average
TN0	0.56±0.10bc	0.12±0.03b	0.08±0.02c	0.25±0.04b
STN0	0.22±0.04d	0.16±0.02b	0.09±0.01bc	0.16±0.01b
SWN0	0.61±0.01b	1.04±0.13a	0.40±0.13a	0.68±0.06a
TN1	0.83±0.06a	0.70±0.18a	0.37±0.0 a	0.63±0.08a
STN1	0.38±0.07cd	0.22±0.04b	0.31±0.04ab	0.30±0.05b
SWN1	0.45±0.05bc	0.81±0.18a	0.37±0.10a	0.54±0.09a

2.2 田面水 pH

各处理田面水 pH 动态变化情况见图 3,田面水 pH 随水稻移栽时间呈先升高后降低的趋势。施氮肥可提高清水灌溉处理田面水 pH,TN1 和 STN1 处理整个肥期的田面水 pH 分别比 TN0 和 STN0 处理高 0.13 和 0.14,达到显著水平。但施加氮肥对生活污水尾水灌溉处理影响并不显著。无论是否施加氮肥,生活污水尾水灌溉处理田面水 pH 在水稻移栽后 7 d 内(基肥期)均显著高于秸秆还田清水灌溉处理(表 4)。

2.3 氨挥发排放通量

各处理氨挥发排放通量动态变化状况见图 4。无

论秸秆是否还田,施加氮肥均使各处理氨挥发排放通量显著提高。蘖肥期各处理氨挥发排放通量最高。TN0 处理氨挥发排放通量在施基肥后 1 d 达到最高峰值,而 STN0 和 SWN0 处理分别在施基肥后 2 d 和 3 d 达到排放最高峰值。与 TN0 处理相比,STN0 处理降低了稻田氨挥发排放通量,TN0 和 STN0 处理氨挥发日排放通量均值分别为 $1.04 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.89 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。与 STN0 处理相比,SWN0 处理氨挥发日排放均值降低了 19%,为 $0.72 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。施氮肥下各处理均在施肥后第 3 d 达到峰值,随后逐渐降低。TN1、STN1 和 SWN1 处理氨挥发日排放均值分别为 3.78、

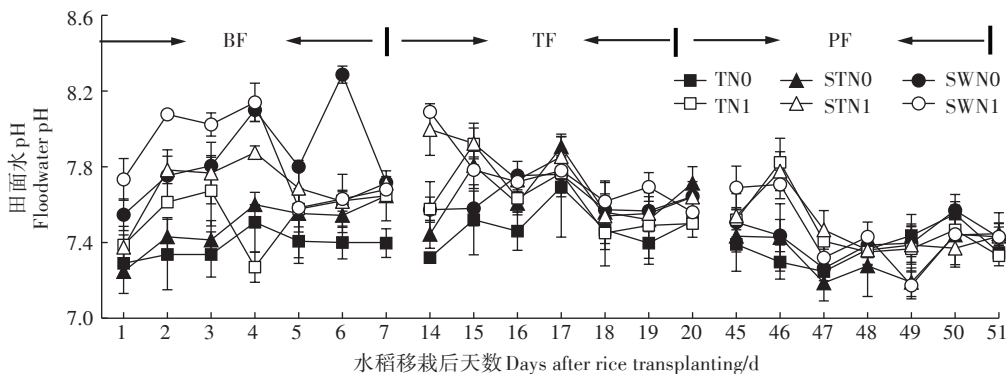


图 3 不同处理田面水 pH 动态变化

Figure 3 Dynamics of floodwater pH under different treatments

表 4 不同处理下不同肥期田面水平均 pH

Table 4 Average pH value in floodwater in different fertilizer stage of different treatments

处理 Treatments	基肥期 Basal fertilizer	蘖肥期 Tiller fertilizer	穗肥期 Panicle fertilizer	均值 Average
TN0	7.38±0.06d	7.48±0.07b	7.38±0.02ab	7.41±0.04c
STN0	7.49±0.01cd	7.65±0.04a	7.34±0.07b	7.50±0.03b
SWN0	7.86±0.02a	7.63±0.01a	7.43±0.02ab	7.64±0.02a
TN1	7.54±0.05c	7.62±0.04a	7.47±0.01a	7.54±0.01b
STN1	7.69±0.02b	7.75±0.02a	7.47±0.04a	7.64±0.02a
SWN1	7.84±0.02a	7.75±0.02a	7.46±0.01ab	7.68±0.02a

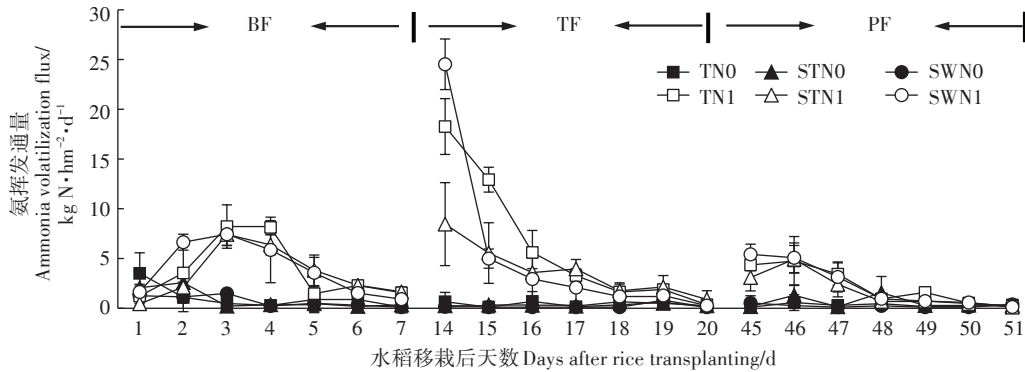


图 4 不同处理氨挥发排放通量

Figure 4 Dynamics of NH_3 volatilization fluxes under different treatments

3.45、3.94 kg N·hm⁻²·d⁻¹,与TN1处理相比,STN1处理使氨挥发日排放均值降低了9%,而SWN1处理氨挥发日排放均值比STN0处理增加了14%。

与基肥期相比,蘖肥期不施氮肥处理的氨挥发排放通量一直保持在较低水平。TN0、STN0、SWN0处理的氨挥发日排放均值分别为0.38、0.36、0.22 kg N·hm⁻²·d⁻¹,SWN0处理比STN0处理降低了39%。与不施氮处理相比,蘖肥施加后显著提高了各处理氨挥发排放通量,并在蘖肥后第1 d达到峰值,其中SWN1处理最高,为24.53 kg N·hm⁻²·d⁻¹,比STN1(8.46 kg N·hm⁻²·d⁻¹)和TN1处理(18.26 kg N·hm⁻²·d⁻¹)分别提高了190%和34%。SWN1处理氨挥发排放通量在施蘖肥2 d后迅速降低,随后均低于STN1和TN1处理。

水稻在穗肥期的氨挥发排放通量较基肥和蘖肥期有所降低。不施氮肥处理下,TN0、STN0和SWN0处理的氨挥发排放通量日均值分别为0.30、0.58、0.25 kg N·hm⁻²·d⁻¹,与TN0处理相比,STN0处理使氨挥发日排放均值增加了93%,而SWN0处理则比STN0处理的氨挥发日排放均值降低57%。施氮肥处理下,SWN1处理氨挥发排放通量于施穗肥第1 d达到排放峰值,TN1和STN1处理均在施肥2 d后达到排放峰值,然后逐渐降低。施氮下各处理氨挥发日排放通量均值以SWN1处理最高(2.29 kg N·hm⁻²·d⁻¹),其次是TN1处理(2.26 kg N·hm⁻²·d⁻¹),而STN1处理最低(1.77 kg N·hm⁻²·d⁻¹)。

2.4 氨挥发累积排放量

各处理氨挥发累积排放量见表5。施加氮肥显著提高了水稻整个肥期氨挥发累积排放量,TN1处理较TN0处理提高了6.15倍,STN1和SWN1处理较STN0和SWN0处理分别提高了3.92倍(清水灌溉)和8.70倍(生活污水尾水灌溉)。不施氮肥下,无论清水还是尾水灌溉,秸秆是否还田,对氨挥发累积排放量均无显著影响。与STN1处理相比,SWN1处理在基肥期、蘖肥期和穗肥期均增加了氨挥发累积排放量,

其中蘖肥期达到显著水平,整个生育期内的总排放量也显著增加了28.6%。

2.5 水稻产量、氮吸收以及单位产量氨挥发排放量

同等氮肥施加条件下,秸秆还田使水稻产量显著降低了15%。无论是否施加氮肥,与清水灌溉处理相比,生活污水尾水灌溉均使水稻产量显著提高,SWN0处理和SWN1处理分别比STN0和STN1处理显著提高了94%和34%($P<0.05$)。

基于水稻产量和氨挥发累积排放量,计算单位产量氨挥发排放量,发现所有施氮处理单位产量氨挥发排放量均显著高于不施氮肥处理。与STN0处理相比,SWN0处理使单位产量氨挥发排放显著降低了72%,与STN1处理相比,SWN1处理虽使单位产量氨挥发累积排放降低了5%,但差异未达显著水平。

由图5可以看出,与TN0处理相比,STN0处理显著提高了水稻秸秆吸氮量,但显著降低了水稻籽粒吸氮量;施加氮肥后,秸秆是否还田对清水灌溉处理无显著影响。与秸秆还田清水灌溉处理相比,无论是否施加氮肥,生活污水尾水灌溉处理均显著提高了籽粒吸氮量和植株吸氮量,植株吸氮量的增幅高达30%(SWN1)和90%(SWN0)。

2.6 土壤脲酶活性

如图6所示,与TN1处理相比,STN1处理显著降低了土壤脲酶活性。与秸秆还田清水灌溉处理相比,无论是否施加氮肥,生活污水尾水灌溉均显著提高了稻田土壤脲酶活性。

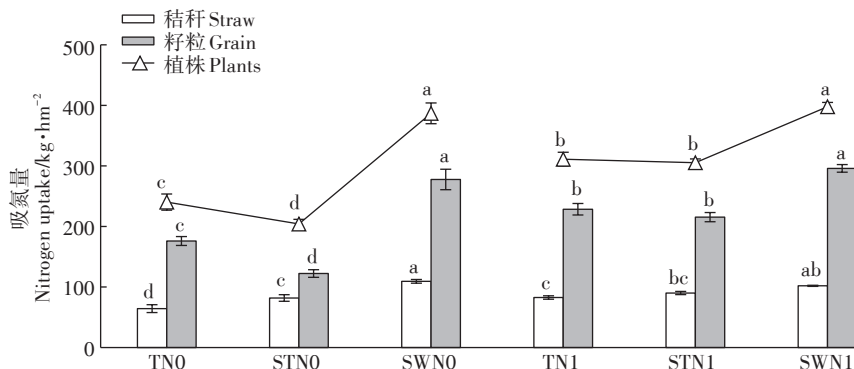
3 讨论

氨挥发过程是NH₄⁺-N在水-气界面多种反应共同参与的复杂动力学过程^[17],NH₄⁺-N是氨挥发作用的重要驱动因子,其浓度直接决定氨挥发潜能。由图7可知,氨挥发排放通量的动态变化特征与田面水pH和NH₄⁺-N浓度变化趋势基本一致,通过Parson相关性分析可得,氨挥发排放通量与田面水NH₄⁺-N和田

表5 不同处理对氨挥发累积排放量的影响(kg·hm⁻²)

Table 5 Cumulative NH₃ emission in different periods of paddy season(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	基肥期 Basal fertilizer	蘖肥期 Tiller fertilizer	穗肥期 Panicle fertilizer	总和 Total
TN0	7.25±2.70b	2.68±0.77c	2.13±0.98b	12.05±4.39c
STN0	6.21±1.42b	2.51±0.66c	4.07±0.30b	12.79±2.26c
SWN0	5.04±1.11b	1.53±0.10c	1.77±0.39b	8.34±0.74c
TN1	26.43±3.98a	43.97±3.19a	15.82±0.60a	86.22±4.22a
STN1	24.15±1.37a	26.33±3.56b	12.42±2.51a	62.90±3.73b
SWN1	27.60±3.63a	37.27±4.52a	16.02±2.69a	80.89±8.92a



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。误差线表示3个重复间的SD值($n=3$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The error bars represents the SD value between three replicates ($n=3$). The same below

图5 不同处理对植株吸氮量的影响

Figure 5 Effects of different treatments on nitrogen uptake of plants

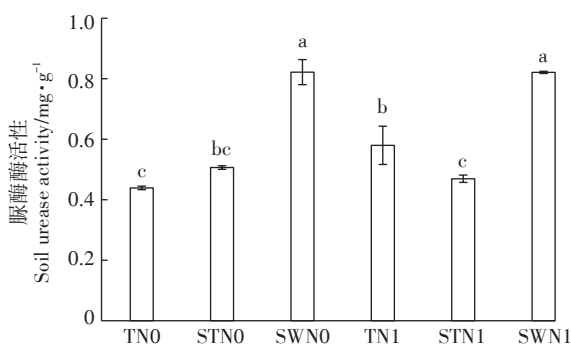


图6 水稻移栽21 d后各处理土壤脲酶活性

Figure 6 Effects of different treatments on soil urease activity at 21 days after transplanting

面水 pH 呈极显著正相关($r=0.823^{**}$ 和 $r=0.381^{**}$, $P<0.01$),尤其是与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,相关系数高达 0.823 ($P<0.01$),这和前人研究结果一致^[16]。与正常灌溉相比,麦秆还田下生活污水灌溉略微降低了基肥期田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,但提高了田面水 pH,而稻田氨挥

发的最终表现为排放量增加,说明 pH 对氨挥发的影响要高于田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。

本研究发现,正常灌溉施氮情况下,秸秆还田较秸秆不还田处理显著降低了氨挥发排放总量,其主要表现为蘖肥期氨挥发排放量显著降低,与张刚等^[6]的研究结果相反,这可能与秸秆还田量、氮肥运筹等有关。秸秆还田后土壤碳氮比的升高^[18],导致土壤氮源被固定^[19],土壤脲酶活性有所降低(图6)^[20],从而抑制尿素的水解,减少氮肥的气态损失。如李宗新等^[21]的研究表明,秸秆还田量为 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,等量氮肥施入下,秸秆还田可减缓氨挥发速率;而本试验中秸秆还田量折算后为 $9\,445\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于张刚等^[6]研究中的 $5\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外,水稻分蘖期苗小,植株根系尚不发达,对氮素的吸收固定作用较弱,且植株生长稀疏,有利于空气流动,因此稻田氨挥发排放主要集中在水稻分蘖期^[22]。邬刚等^[23]的研究表明,在保证施氮量一致的前提下,降低 20% 基肥比例可显著

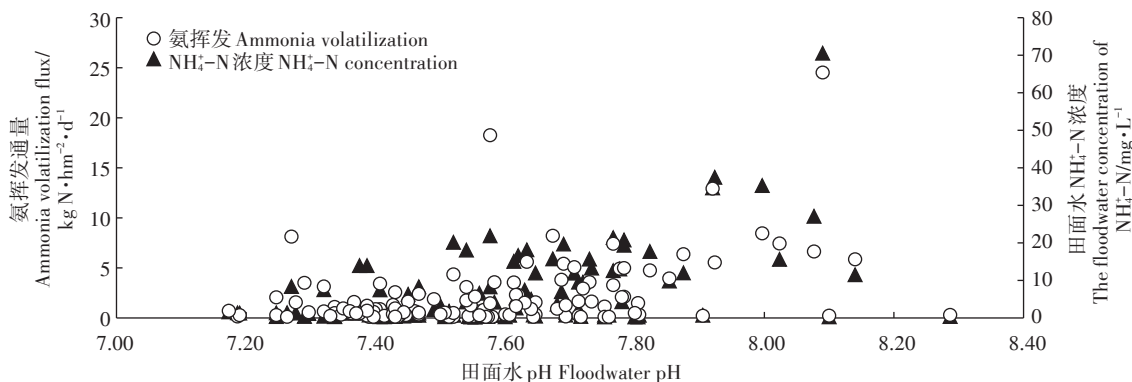


图7 氨挥发排放通量与田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和田面水 pH 相关性分析

Figure 7 Correlation analysis of ammonia volatilization flux with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and pH of floodwater

减少基肥期氨挥发累积排放量,与张刚等^[6]研究中的基肥运筹(40%)相比,本试验中基肥占比为30%,这也是本研究中秸秆还田使水稻分蘖期氨挥发排放显著降低的原因之一(表5)。

目前关于氨挥发累积排放的报道多为单位面积氨挥发排放量^[24-25],但对于以产量为首要目标的农业实际生产而言,考察单位产量下的氨挥发排放更具现实意义^[26]。研究发现,与清水灌溉相比,用富含 NO_3^- -N的生活污水尾水灌溉秸秆还田稻田,在不施氮肥时显著减少了氨挥发排放,而配施氮肥时却增加了稻田氨挥发(表5),这可能与田面水中的铵硝转化有关。秸秆还田不施氮肥时,富含 NO_3^- -N的生活污水尾水灌溉提供了一部分 NO_3^- -N氮源,而秸秆对低浓度 NO_3^- -N有很强的吸附去除效率^[27],可加速反硝化进程,使 NO_3^- -N转化为 NH_4^+ -N;而水稻为喜铵作物,转化而来的 NH_4^+ -N迅速被水稻吸收,因此,田面水中 NH_4^+ -N浓度表现为降低趋势(图1),水稻氮吸收却显著增加(图5),最终的产量也显著高于正常灌溉处理(表6),单位产量的氨挥发显著低于正常灌溉处理(表6)。而秸秆还田配施氮肥情况下生活污水尾水灌溉处理在基肥施用的尿素用量与正常灌溉处理一致,但由于自身带入了约 $6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮源, NO_3^- -N源加入的刺激加速了秸秆碳的释放,充足的碳源提高了土壤反硝化微生物的活性^[27-28],与秸秆还田清水灌溉处理相比,显著提高了田面水 NO_3^- -N浓度。此外,生活污水尾水处理下土壤脲酶活性显著提高(图6)^[29],脲酶促进了尿素的水解过程^[30],使氨挥发排放增加。与秸秆不还田处理相比,生活污水尾水灌溉耦合秸秆还田在基肥期显著降低了田面水 NH_4^+ -N浓度和 NO_3^- -N浓度,因此生活污水尾水灌溉虽提高了田面水pH(图3),但生活污水尾水耦合秸秆还田处理氨挥发排放并未显著增加,且因其显著增加了水稻产量,单位产量下氨挥发排放低于清水灌

溉处理(表6)。苏芳等^[31]的研究表明,施氮量相同的情况下,与尿素相比,施加硝酸铵化肥可降低氨挥发排放25.45%,因此与单施 NH_4^+ -N肥相比,加入 NO_3^- -N肥可显著提高植株吸氮量,减少氨挥发损失。

作为人口众多的缺水国家,我国目前已建成污水处理厂4 000余座,每日可处理污水 $1.7\times 10^9\text{ m}^3$ ^[32],废水达标排放率在90%以上^[33],而二次水的循环利用率却仅有30%左右^[34]。因此生活污水尾水资源化,提高污水回收利用率,对解决水资源短缺现状具有重要意义。而本研究结果显示尾水灌溉可以替代部分化肥并显著增加水稻产量,降低单位产量氨挥发排放量,无论对于水稻生产还是环境保护均有积极作用。但本研究是在土柱试验条件下得出的结果,还需要在大田进一步验证。

4 结论

(1)生活污水尾水灌溉秸秆还田稻田显著增加了水稻产量和吸氮量。

(2)生活污水灌溉秸秆还田稻田显著增加了田面水 NO_3^- -N浓度和田面水pH;与秸秆还田清水灌溉处理相比,生活污水尾水灌溉在不施氮肥时显著降低了稻季氨挥发累积排放量,在施氮肥时(同等氮投入,包括尾水代入的氮),生活污水尾水灌溉则显著提高了稻季氨挥发累积排放量,但单位产量氨挥发排放量有所降低。

参考文献:

- [1] Fillery I, Vlek P. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields[J]. *Nitrogen Economy of Flooded Rice Soils*, 1986, 9(1): 79-98.
- [2] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Reducing ammonia volatilization in a no-till soil by incorporating urea and pig slurry in shallow bands[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 71-80.
- [3] Schulze E D, De Vries W, Hauhs M, et al. Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989, 48(3/4): 451-456.
- [4] Han W, He M. The application of exogenous cellulase to improve soil fertility and plant growth due to acceleration of straw decomposition[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(10): 3724-3731.
- [5] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 915-921.

MA Chao, ZHOU Jing, LIU Man-qiang, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in Shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 915-921.

表6 不同处理水稻产量及水稻单位产量的氨挥发损失量

Table 6 Rice yield and yield-scale NH_3 volatilization losses

处理 Treatments	水稻产量 Rice yields/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	单位产量氨挥发排放量 Yield-scale NH_3 volatilization losses/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
TN0	79.99±4.67c	1.03±0.33bc
STN0	71.40±3.00c	1.53±0.25b
SWN0	138.42±10.28a	0.43±0.05c
TN1	132.43±3.45a	4.61±0.31a
STN1	112.23±6.42b	3.99±0.37a
SWN1	150.71±3.22a	3.80±0.43a

- [6] 张 刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4):877-885.
- ZHANG Gang, WANG De-jian, YU Yuan-chun, et al. Effects of straw incorporation on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4):877-885.
- [7] 山 仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002, 33(9):27-31.
- SHAN Lun, DENG Xi-ping, KANG Shao-zhong. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(9):27-31.
- [8] 刘雁南, 杜 森, 余 扬, 等. 美国内布拉斯加州农业水资源保护与可持续利用对中国的启示: 基于自然资源区划的水资源管理模式[J]. 世界农业, 2019(4):20-24.
- LIU Yan-nan, DU Sen, YU Yang, et al. Implications for China from the protection and sustainable use of agricultural water resources in Nebraska: Water resources management model based on natural resource regionalization[J]. *World Agriculture*, 2019(4):20-24.
- [9] Hanjra M A, Blackwell J, Carr G, et al. Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2012, 215(3):255-269.
- [10] Mounzer O, Pedrero-Salcedo F, Nortes P A, et al. Transient soil salinity under the combined effect of reclaimed water and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120:23-29.
- [11] 张翠英, 汪永进, 徐德兰, 等. 污灌对农田土壤微生物特性影响研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3):490-495.
- ZHANG Cui-ying, WANG Yong-jin, XU De-lan, et al. Effects of sewage irrigation on quantity and distribution of microorganisms in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3):490-495.
- [12] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4):768-776.
- YIN Ai-jing, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):768-776.
- [13] da Fonseca A F, Leal R M P, Herpin U, et al. Carbon and nitrogen dynamics in a Brazilian soil-pasture system irrigated with treated sewage effluent[J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2011, 59(2/3/4):147-157.
- [14] 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 等. 生活污水灌溉对麦秸还田稻田氮挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10):3963-3970.
- XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, et al. Effect of straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10):3963-3970.
- [15] 常 勇, 黄忠勤, 周兴根, 等. 不同麦秸还田量对水稻生长发育、产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20):47-51.
- CHANG Yong, HUANG Zhong-qin, ZHOU Xing-gen, et al. Impacts of different wheat straw returning amount on growth, yield and quality [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(20):47-51.
- [16] 余 姗, 薛利红, 花 昀, 等. 水热炭减少稻田氮挥发损失的效果与机制初探[J]. 环境科学, 2020, 41(2):922-931.
- YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. Preliminary study on effect of applying hydrochar on reducing ammonia volatilization and its mechanisms in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2):922-931.
- [17] Zhuang S, Yin B, Zhu Z. Model estimation of volatilization of ammonia applied with surface film-forming material[J]. *Pedosphere*, 1999, 9(4):299-304.
- [18] Tanaka H, Kyaw K M, Toyota K, et al. Influence of application of rice straw, farmyard manure, and municipal biowastes on nitrogen fixation, soil microbial biomass N, and mineral N in a model paddy microcosm [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2006, 42(6):501-505.
- [19] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 等. 不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2):37-40.
- TANG Yu-xia, MENG Chun-xiang, JIA Shu-long, et al. Effects of different C/N combinations of fertilizers on nitrogen biological fixation and release of fertilizer and wheat growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2):37-40.
- [20] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2192-2199.
- HAN Xin-zhong, ZHU Li-qun, YANG Min-fang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2192-2199.
- [21] 李宗新, 王庆成, 刘开昌, 等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氮挥发规律[J]. 生态学报, 2009, 29(1):307-314.
- LI Zong-xin, WANG Qing-cheng, LIU Kai-chang, et al. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):307-314.
- [22] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氮挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(2):240-244.
- SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):240-244.
- [23] 郭 刚, 袁嫚嫚, 曹哲伟, 等. 不同水氮管理条件下稻田氮挥发损失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5):651-658.
- WU Gang, YUAN Man-man, CAO Zhe-wei, et al. Ammonia volatilization under different water management and nitrogen schemes in a paddy field[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5):651-658.
- [24] 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 等. 两种土壤增效剂对稻田氮挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8):3746-3752.
- ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, et al. Effect of two soil synergists on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8):3746-3752.
- [25] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氮挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-269.

- SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui, LIN De-xi, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Tai Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.
- [26] Feng Y, Sun H, Xue L, et al. Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH_3 volatilization dramatically in rice paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2017, 168:1277-1284.
- [27] 李乐乐, 张卫民, 何江涛, 等. 玉米秸秆碳源释放特征及反硝化效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1):113-118.
- LI Le-le, ZHANG Wei-min, HE Jiang-tao, et al. Characteristics of COD release in corn straw and its denitrification effect[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1):113-118.
- [28] Zou J, Liu S, Qin Y, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 2009, 129(4):516-522.
- [29] 刘雅文, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水尾水灌溉对麦秸还田水稻幼苗及土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8):2739-2745.
- LIU Ya-wen, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, et al. Effects of sewage irrigation on growth of rice seedlings and soil environment with straw incorporation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2739-2745.
- [30] Kandeler E, Gerber H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 6(1):68-72.
- [31] 苏芳, 黄彬香, 丁新泉, 等. 不同氮肥形态的氨挥发损失比较[J]. 土壤, 2006, 38(6):682-686.
- SU Fang, HUANG Bin-xiang, DING Xin-quan, et al. Ammonia volatilization of different nitrogen fertilizer types[J]. *Soils*, 2006, 38(6):682-686.
- [32] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6):12-15.
- GUO Hong-li, LI Xin-wei, REN Qin-yi, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(6):12-15.
- [33] 王熹, 王湛, 杨文涛, 等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程, 2014, 32(7):1-5.
- WANG Xi, WANG Zhan, YANG Wen-tao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7):1-5.
- [34] 边志明, 张蕾. 中国水资源存在的主要问题及合理开发利用新理念[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(10):147-153.
- BIAN Zhi-ming, ZHANG Lei. Main problems in the exploitation of China's water resources and some new fresh ideas to them[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(10):147-153.