

秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果

肖其亮, 朱坚, 彭华, 简燕, 纪雄辉

引用本文:

肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2788–2800.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0318>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 邵红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

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

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1623–1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2788–2800.
XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Effects of controlled release fertilizer combined with rice straw on ammonia volatilization from double-cropping rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2788–2800.



开放科学 OSID

秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果

肖其亮¹, 朱坚^{2,3,4,5}, 彭华^{2,3,4,5}, 简燕^{2,3,4,5}, 纪雄辉^{1,2,3,4,5*}

(1. 湖南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 2. 湖南省农业环境生态研究所, 长沙 410125; 3. 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 4. 农田土壤重金属污染防控与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125; 5. 湖南省洞庭湖流域农业面源污染防治工程技术研究中心, 长沙 410125)

摘要:为减少双季稻田氨(NH₃)挥发损失,以农民常规施肥采取的尿素一次性表施(CF)为对照,在氮肥深施条件下,设置秸秆还田(R₁)、秸秆移除(R₀)两种水稻秸秆利用方式和常规尿素(CU)、包膜尿素减量(PU)、控释尿素减量(LU)3种不同施肥模式,研究了在双季稻种植模式下深施、秸秆利用方式及施肥模式对稻田田面水氮浓度、pH值及NH₃挥发损失的影响。结果表明:早、晚稻NH₃挥发均主要发生在施肥后一周,且晚稻NH₃挥发量远大于早稻。不同施肥处理双季稻NH₃挥发总量依次为CF>CU>CU₁>LU₀>LU₁>PU₀>PU₁;秸秆利用方式显著影响NH₃挥发,但对田面水氮素浓度影响较小。与R₀处理相比,R₁处理NH₃挥发显著降低了8.67%;施肥模式显著影响NH₃挥发和田面水氮素浓度。与CU处理相比,PU和LU处理NH₃挥发分别显著降低了75.68%和39.14%;秸秆利用方式与施肥管理交互作用显著,其中R₁与PU结合效果最佳,PU₁处理较PU₀处理可降低15.07%的NH₃挥发。研究表明,适当降低施氮水平,采取包膜尿素深施并搭配秸秆还田的施肥管理模式,是具环境友好性的氮肥管理模式。

关键词:秸秆还田;缓释肥;控释肥;双季稻;氨挥发;田面水

中图分类号:S511.42 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)12-2788-13 doi:10.11654/jaes.2021-0318

Effects of controlled release fertilizer combined with rice straw on ammonia volatilization from double-cropping rice fields

XIAO Qiliang¹, ZHU Jian^{2,3,4,5}, PENG Hua^{2,3,4,5}, JIAN Yan^{2,3,4,5}, JI Xionghui^{1,2,3,4,5*}

(1. Longping Branch of Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China; 2. Hunan Institute of Agri-Environment and Ecology, Changsha 410125, China; 3. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agri-Environment in the Middle Reach Plain of Yangtze River, Changsha 410125, China; 4. Hunan Province Key Laboratory of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution, Changsha 410125, China; 5. Hunan Dongting Lake Basin Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control, Changsha 410125, China)

Abstract: This study evaluated seven treatments to reduce ammonia (NH₃) volatilization in double-cropping rice fields. These included two straw utilization methods [straw returning (R₁) and straw removal (R₀)] and three deep fertilization modes [conventional urea (CU), coated urea reduction (PU), and controlled urea reduction (LU)]. Conventional fertilization [surface application of urea (CF)] was used as a control. The effects of deep fertilization, straw utilization, and fertilization modes on surface water nitrogen concentrations, pH, and NH₃

收稿日期: 2021-03-16 录用日期: 2021-05-20

作者简介: 肖其亮(1997—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,从事污染与恢复生态学研究。E-mail: xiaoqiliang@hnu.edu.cn

*通信作者: 纪雄辉 E-mail: 1546861600@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800501)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800501)

volatilization dynamics were investigated. Results of the study show that NH_3 volatilization from early and late rice fields occurred primarily within one week of fertilization. Moreover, late rice fields exhibited considerably large NH_3 volatilization than early rice fields. Total NH_3 volatilization rates from treatment combinations of CF, CUR_0 , CUR_1 , PUR_0 , PUR_1 , LUR_0 , and LUR_1 in double-cropping rice fields are: $\text{CF} > \text{CUR}_0 > \text{CUR}_1 > \text{LUR}_0 > \text{LUR}_1 > \text{PUR}_0 > \text{PUR}_1$. Straw returning significantly affected NH_3 volatilization, but had a negligible effect on nitrogen concentrations in field water. Compared to the R_0 treatment, the NH_3 volatilization with the R_1 treatment was measurably reduced (by 8.67%). The fertilization mode significantly affects NH_3 volatilization and nitrogen concentration in field water. Compared with the CU treatment, the NH_3 volatilization from the PU and LU treatments was substantially reduced (by 75.68% and 39.14%, respectively). Moreover, there was a significant interaction between the straw returning method and fertilization mode. The combination of R_1 and PU produced the best results. Compared to the PUR_0 treatment, the PUR_1 treatment reduced NH_3 volatilization by 15.07%. Results suggested that the combination of reduced nitrogen fertilizer, deep fertilization of coated urea, and straw returning is an effective and environmentally friendly strategy for nitrogen management in double-cropping rice production.

Keywords: straw returning; slow-release fertilizer; controlled release fertilizer; double-cropping rice; ammonia volatilization; field water

我国是主要的水稻生产国,其种植面积约占世界水稻总种植面积的19%,但水稻产量占比高达28%^[1]。水稻是南方地区主要种植作物,为了追求高产,该地区耕地长期处于高复种指数和高肥料施用量的生产状态,氮素损失较为严重^[2]。氨(NH_3)挥发作为稻田氮素损失的主要途径,约占稻田总反应性氮素损失的70%^[3]。研究指出,南方双季稻种植模式下, NH_3 挥发损失可高达施肥量的40%^[4-5],这不仅导致了较低的氮肥利用率和作物产量,还给生态环境造成了巨大危害^[3,6]。因此,优化氮肥施用对于降低稻田氮素损失、提高粮食产量以及缓解环境压力具有重要的现实意义。

NH_3 挥发主要来源于氮肥施入土壤后所引发的一系列物理化学过程,这一过程受诸多因素的影响,因而通过调控这些因素以降低 NH_3 挥发的各种措施被提出,例如氮肥减量深施与缓控释肥的使用等^[7-9]。氮肥减量深施是目前降低稻田 NH_3 挥发损失的一种有效施肥方式,利用土壤胶体表面的负电荷特性,可使水解的铵根离子(NH_4^+)被周围土壤颗粒迅速吸附^[10-13]。相关研究指出,深施能实现氮素的缓慢释放,为水稻生长提供充足和均衡的养分,减氮20%~25%处理可在稳定产量的同时,大幅减少 NH_3 挥发的产生^[10,14]。缓控释肥作为一种调控氮素释放的新型肥料,可协调土壤氮素养分供应与水稻氮素需求,有效降低 NH_3 挥发并提高氮素利用率和作物产量^[8,15]。研究表明,不同类型缓控释肥的释放速率等特性差异较大,但大多密度较低,如果采取稻田表施则易漂浮于水面,进而产生富营养化的威胁^[16]。因此,采取缓控释肥与氮肥减量深施结合的施肥模式,可有效解决以上问题,充分减少稻田氮素养分流失和 NH_3 挥发^[7,16-18]。

秸秆还田作为一项合理利用生物质资源的重要途径,不仅能够减少因秸秆焚烧带来的环境污染问题,还可以提高土壤有机质、氮素库容并改善土壤质地结构。目前,关于秸秆还田对稻田 NH_3 挥发的影响研究仍存在较大差异。有研究指出,秸秆还田可促进微生物活性、提高有机质含量和阳离子交换量,有利于土壤硝化反应、有机氮固持和吸附 NH_4^+ 等一系列降低田面水 NH_4^+ 浓度的机制进行^[19-21]。也有研究认为,微生物活性的提高会加快氮肥的水解,同时秸秆降解产生的有机基团会中和酸根离子,最终提高田面水 NH_4^+ 浓度和pH,促进 NH_3 的挥发^[22-25]。研究结果的差异可能与气候、施肥方法和秸秆类型及性质有关^[19,23,26]。因此,进一步研究秸秆还田对南方双季稻田 NH_3 挥发的影响具有重要意义。

当前,有关秸秆还田与缓控释肥对稻田 NH_3 挥发的影响多为单因素分析,而将两者相结合的研究较少^[27]。因此,本研究在南方典型双季稻模式下,探讨了缓控释肥减量与秸秆配施对双季稻田田面水氮素浓度和 NH_3 挥发损失的影响,以期明确该地区不同缓控释肥和秸秆配施与 NH_3 挥发损失量的关系,为合理控制南方双季稻田 NH_3 挥发损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2019年在湖南省汨罗市屈原管理区(28°55'45"N, 112°56'39"E)进行。研究区位于长江中游地区,属亚热带季风湿润气候,气候温和,四季分明,雨量充沛。春夏冷暖气流交替频繁,夏秋晴热少雨,年平均气温为17℃,年降水量约1300mm,无霜期约270d。试验区供试土壤为潜育型水稻土,双季稻是其主要种植模式。试验前土壤基本理化性质为:

有机质 $39.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $2.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $14.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $164.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $3.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $171.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 4.89。NH₃挥发采集期间日最高、最低气温与降雨量从中国气象数据网获得(图1)。

1.2 试验设计

采用田间小区试验,以当地农民习惯施肥尿素表施为对照(CF),在氮肥深施基础上,采用裂区设计,主处理为秸秆利用方式,设秸秆还田(R₁)、秸秆移除(R₀)2种;次处理为不同施肥模式,设尿素深施(CU)、包膜尿素减量深施(PU)、控释尿素减量深施(LU)3种。试验共7个处理,每个处理3次重复,小区面积为 32 m^2 ($4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$),随机区组排列。包膜尿素来自山东金正生态工程股份有限公司,养分释放期为3个月,包膜材料为树脂包膜,含氮量为42%;控释尿素为单位自研产品,含氮量42%;磷钾肥分别为钙镁磷肥($12\% \text{ P}_2\text{O}_5$)和氯化钾($60\% \text{ K}_2\text{O}$)。

早、晚稻施肥量保持一致,常规施氮量和减氮优化施肥处理氮肥用量分别为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (折合成纯氮计);磷肥用量(P_2O_5)为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;钾肥用量(K_2O)为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;秸秆用量为 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,早、晚稻均采用上一季水稻秸秆。所有肥料在插秧前1 d全部作基肥一次性施入,不再进行追肥。秸秆剪碎成5~10 cm还田。CF处理采用当地常规施肥方式,在插秧前1 d全部作基肥一次性表面撒施;其余深施处理则在施肥后立即用锄头翻入约10 cm深的土层。早稻于2019年4月24日插秧,晚稻于2019年7月31日插秧,每穴3~5株秧苗,插秧密度、灌水和病虫害防治等田间管理均与当地农民习惯保持

一致。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 水样采集与测定

于早稻基肥施用后的第1、3、5、7、9、15、25 d,晚稻基肥施用后的第1、3、5、7、9、15 d,在不扰动土层的情况下,用100 mL医用注射器抽取5处田面水于洁净的250 mL聚乙烯塑料瓶中制成混合水样,将水样置于4℃冰箱保存,一周内测样完毕。原位测定田面水pH,田面水样品过滤后用SKALAR流动分析仪测定水样的总氮、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量。

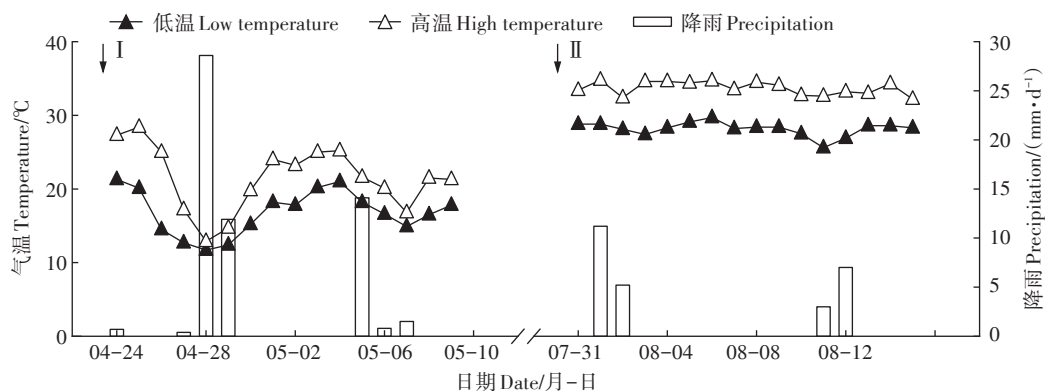
1.3.2 NH₃挥发的田间原位测定

稻田NH₃挥发采用封闭式酸吸收法测定^[28],装置由内径18 cm、高28 cm的硬质PVC管底座和管盖制成(图2)。在施肥后24 h内将装置固定于水稻植株的间隙中,插入土壤8 cm深处,并在整个生育期内保持位置不变。测定时,在装置内放入20 cm高的铁支架,将装有30 mL 2%硼酸(H_3BO_3)溶液的蒸发皿放在支架上,管口用保鲜膜密封并拧紧PVC管盖,形成一个完全密闭的环境,用以吸收挥发的氨(NH₃)。收集24 h后打开管盖,提取硼酸吸收液,利用标准液 $c(1/2\text{H}_2\text{SO}_4)=0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 滴定。已有研究表明,无机氮肥施用具有集中释放的特征,稻田NH₃挥发的排放主要集中在施肥后一周内,因此无机氮肥施用后9 d内每日采样一次,之后在第15 d采集一次,以后延长至10 d采集一次,直至监测不到NH₃挥发,缓控释肥NH₃挥发采集时间与无机氮肥处理采集时间同步^[16]。

1.4 数据处理与分析

土壤NH₃挥发速率计算公式为:

$$V_{\text{NH}_3-\text{N}} = 10^{-2} \times C \times V \times 14 / S$$



向下箭头 I 和 II 分别表示早、晚稻施肥日期。下同
The downward arrows I and II indicate the date of fertilization for early and late rice respectively. The same below

图1 2019年NH₃监测试验期间降雨量和气温情况

Figure 1 Rain fall and temperature during NH₃ monitoring experimental period in 2019

式中: $V_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 为 NH_3 挥发速率, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; C 为 H^+ 浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为滴定用去标准酸的体积, mL ; 14 为摩尔质量, $\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$; S 为捕获装置的横切面积, m^2 。

土壤 NH_3 挥发总量=测定时期内每次收集的 NH_3 挥发通量之和+未监测天数的 NH_3 挥发量之和(通过相邻2次测定的 NH_3 挥发量均值估算)

土壤 NH_3 挥发损失率= NH_3 挥发累积损失量/施氮量 $\times 100\%$

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据整理, SPSS 26.0 软件进行数据统计分析, Origin 2021 作图。

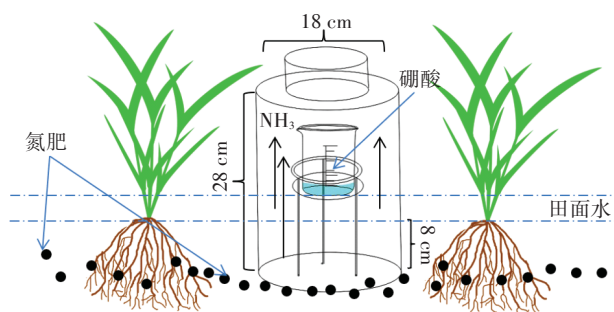


图2 稻田小区试验 NH_3 监测示意图

Figure 2 Monitoring of NH_3 in rice field community test

采用 SPSS 中 Duncan 法在 0.05 水平上比较不同处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 田面水氮素浓度及 pH

2.1.1 总氮

由图 3a 可知, 施肥后各处理田面水总氮浓度变化趋势基本相似, 早、晚稻田面水总氮峰值分别发生在施肥后第 2~4 d 和第 1 d, 为 $48.26 \sim 131.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $28.20 \sim 103.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均以 CF 处理最高。之后总氮浓度迅速下降, 各处理早、晚稻平均浓度于第 5 d 分别降至平均峰值的 32.70% 和 21.22% 后趋于稳定。施肥后一周, 与 CF 处理相比, CU、PU 和 LU 3 种施肥模式早、晚稻总氮浓度峰值分别降低 9.50%~12.29%、60.89%~67.29% 和 30.59%~48.26% ($P < 0.05$)。这说明 3 种施肥模式均有利于降低田面水总氮浓度峰值, 延缓施肥后田面水总氮浓度过快升高。不同缓控释肥处理之间, PU 处理田面水总氮浓度明显低于 LU 处理。施肥后一周内, PU 处理早、晚稻田面水总氮平均浓度比 LU 处理分别显著降低 43.66%、36.77% ($P < 0.05$)。秸秆还田对控制田面水总氮浓度效果有限,

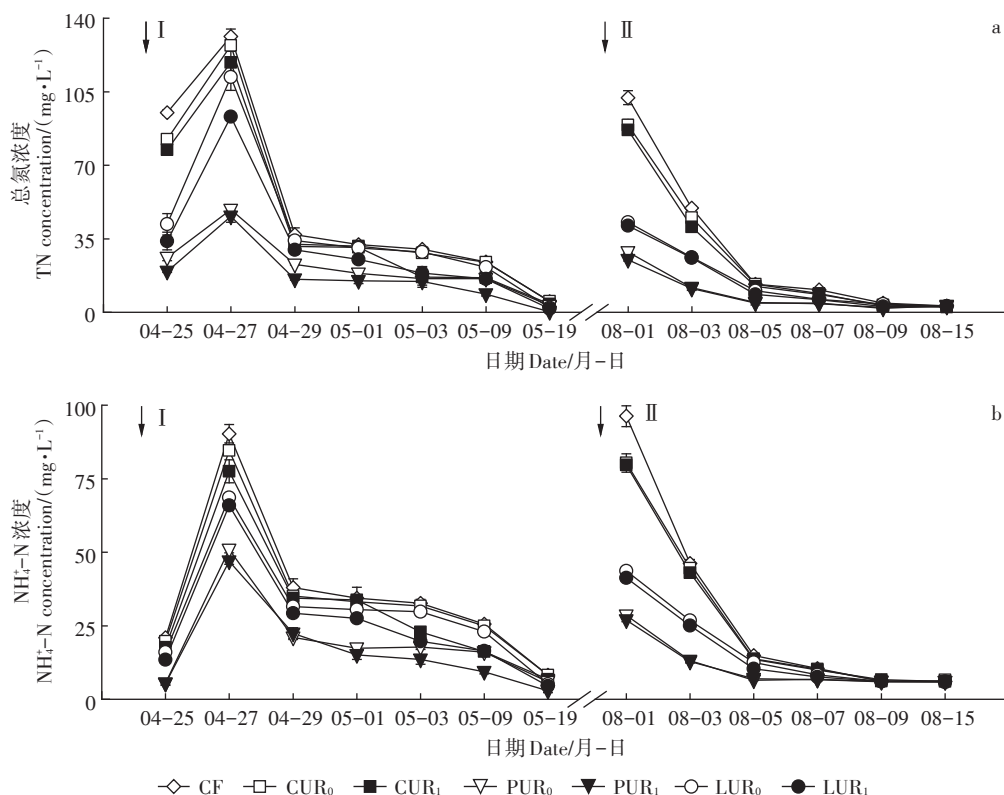


图3 不同处理总氮和 NH_4^+-N 浓度的季节性变化

Figure 3 Seasonal changes of total nitrogen and NH_4^+-N concentration under different treatments

R_1 处理较 R_0 处理早、晚稻总氮浓度分别降低6.22%~16.23%、2.63%~11.05%,其中仅LU处理之间达到显著差异($P<0.05$)。

2.1.2 铵态氮

由图3b可知,早、晚稻各处理田面水 NH_4^+-N 浓度变化与总氮一致, NH_4^+-N 浓度峰值也分别发生在施肥后第2~4 d和第1 d,之后迅速下降,于5 d后分别降至平均峰值的43.68%和19.81%。施肥后一周,较CF处理,CU、PU和LU 3种施肥模式早、晚稻 NH_4^+-N 浓度峰值分别降低8.48%~12.04%、49.75%~67.74%和22.93%~47.72%($P<0.05$)。不同秸秆利用方式之间, R_1 处理较 R_0 处理早、晚稻仅分别降低6.33%、3.98%。试验结果表明,CU、PU和LU处理均能有效降低田面水 NH_4^+-N 浓度,其中PU处理效果最好; R_1 对控制田面水 NH_4^+-N 浓度作用很小,与 R_0 相比,虽然降低了 NH_4^+-N 浓度,但均未达到显著差异。

2.1.3 硝态氮

由于早、晚稻施肥后各处理田面水 NO_3^--N 浓度较低、波动较大且无明显峰值(数据未呈现),因此仅对处理间田面水 NO_3^--N 平均浓度进行比较(图4)。结果表明,早、晚稻田面水 NO_3^--N 平均浓度均在 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,远低于其 NH_4^+-N 浓度,这是因为监测期稻田一直处于淹水、厌氧环境,田面水中主要以 NH_4^+-N 形态存在。施肥后,早、晚稻田面水 NO_3^--N 平均浓度均以CF处理最高,较其他处理分别显著高出28.10%~179.81%、28.85%~90.07%;其中与 R_0 处理相比, R_1 处理早、晚稻田面水 NO_3^--N 平均浓度分别降低21.82%和14.60%;PU比LU则分别降低了24.76%和9.53%。这表明深施、秸秆还田和缓控释肥均能起到

减少田面水 NO_3^--N 浓度的作用,且包膜尿素效果优于控释尿素。

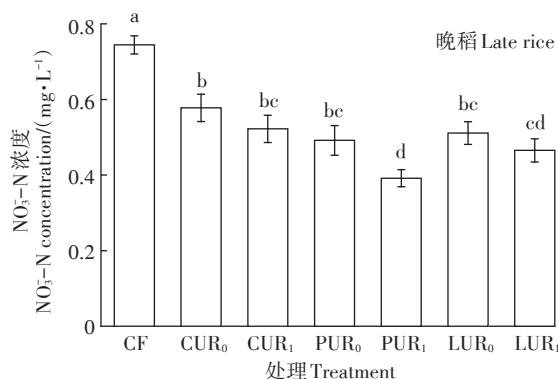
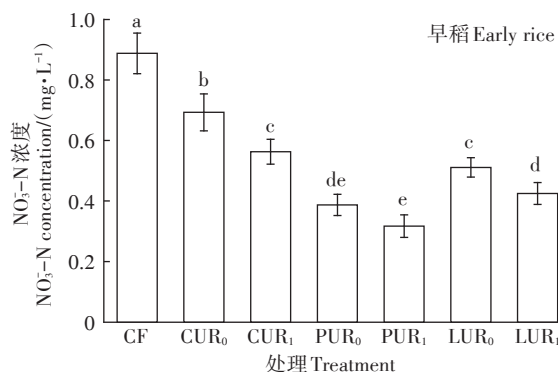
2.1.4 pH

由于早、晚稻施肥后各处理田面水pH均无显著差异,因此仅对每日各处理田面水平均pH进行动态比较。从图5可以看出,各施肥处理之间田面水pH差异较小,均表现为施肥后田面水pH迅速升高,随后早稻至施肥9 d(晚稻5 d)后pH趋于稳定。与田面水 NH_4^+-N 浓度变化趋势表现不同,监测期内早、晚稻田面水pH并未出现回落,早稻至施肥后25 d(晚稻15 d)田面水仍处于较高的pH水平,而早、晚稻田面水中的 NH_4^+-N 平均浓度已降至平均峰值的8.59%、10.67%。从整个试验监测期内可以发现,田面水pH变化幅度较小,早、晚稻田面水pH分别介于6.50~7.63和6.19~7.00。其中早稻田面水pH较晚稻更高且变化幅度更大,早稻田面水平均最大pH为7.60,晚稻为6.93,比施肥第1 d时分别提高了0.97和0.59。

2.2 稻田 NH_3 挥发损失特征

2.2.1 NH_3 挥发速率

由图6可知,早、晚稻各处理 NH_3 挥发速率动态变化趋势与田面水总氮及 NH_4^+-N 浓度的动态变化趋势总体一致。早、晚稻各处理 NH_3 挥发速率均分别在施肥后第2 d和第1 d达到峰值,为 $1.27\sim 7.82 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.09\sim 7.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。早稻 NH_3 挥发速率于第3 d开始迅速下降,各处理平均降至平均峰值的48.4%,之后缓慢下降,而晚稻下降一直较缓慢,第2 d平均 NH_3 挥发速率仍有平均峰值的88.0%,于第7 d才降至平均峰值的50.9%。最终早、晚稻各处理均于施肥后第15 d NH_3 挥发速率无明显差异,为 $0\sim 0.55 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。



不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level

图4 不同处理对 NO_3^--N 浓度的影响

Figure 4 Effects of different treatments on NO_3^--N concentration

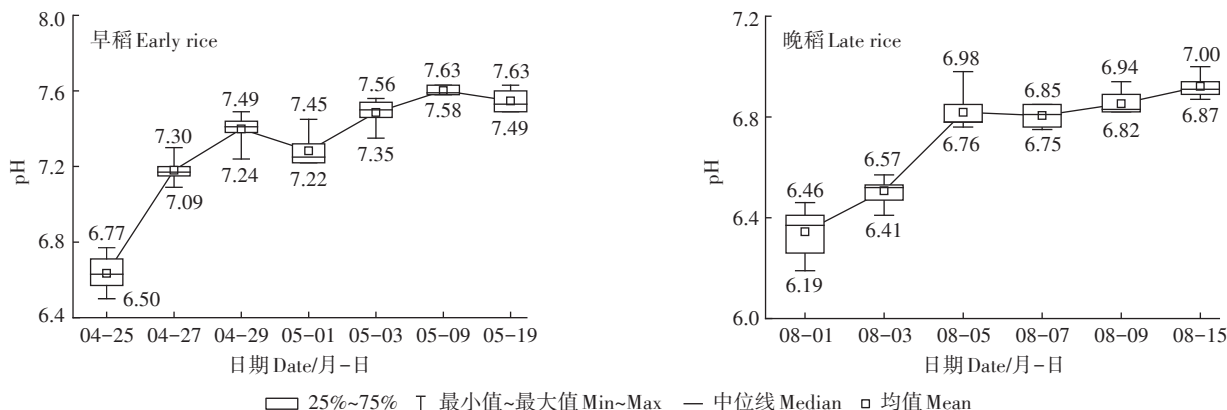
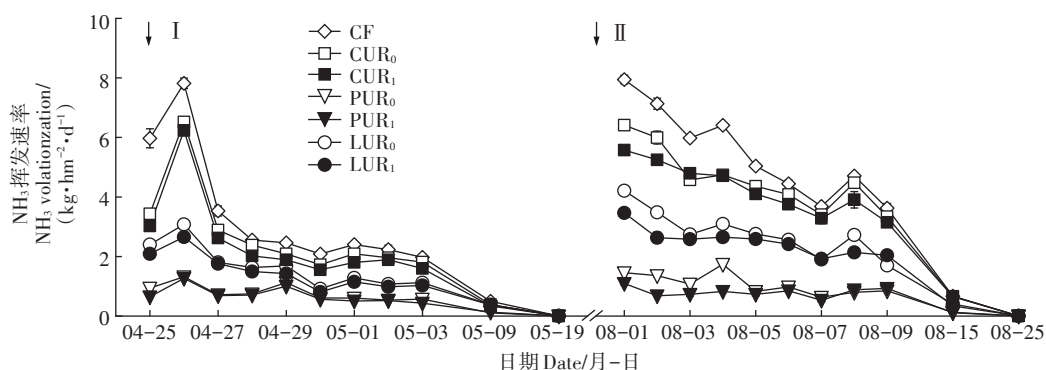


图5 各施肥处理整体pH动态变化

Figure 5 Effects of different treatments on pH

图6 不同处理稻田NH₃挥发速率的季节性变化Figure 6 Seasonal changes in NH₃ volatilization rate under different treatments

CF处理NH₃挥发速率峰值最高,早、晚稻分别为7.82 kg·hm⁻²和7.94 kg·hm⁻²,各施肥处理NH₃挥发速率峰值顺序早、晚稻一致,均为CF>CUR₀>CUR₁>LUR₀>LUR₁>PUR₀>PUR₁。不同施肥模式之间,CU、PU和LU处理较CF处理早、晚稻NH₃挥发速率峰值分别降低18.44%~24.56%、83.50%~83.99%和63.35%~51.72% ($P<0.05$)。而不同秸秆利用之间,R₁处理较R₀处理早、晚稻则分别降低7.00%和16.09% ($P<0.05$),其中早、晚稻分别以LUR₁和PUR₁处理效果最佳,较LUR₀和PUR₀处理分别降低13.88%和25.00%。

2.2.2 NH₃挥发损失总量

由表1可知,早、晚稻施肥后,CF处理NH₃挥发损失总量(率)均最高,早稻为39.87 kg·hm⁻²(22.15%),晚稻为63.31 kg·hm⁻²(35.17%),远高于早稻。早、晚稻CUR₀、CUR₁、PUR₀、PUR₁、LUR₀和LUR₁处理NH₃挥发量较CF处理分别显著降低13.16%~18.61%、18.53%~26.59%、76.50%~79.85%、78.95%~83.57%、47.99%~48.54%和52.58%~52.31%。秸秆利用方式与施肥模式显著影响早、晚稻NH₃挥发(表1)。与R₀

处理相比,早、晚稻R₁处理NH₃挥发量显著降低了8.12%~9.57% ($P<0.05$),其中早、晚稻CUR₁、PUR₁和LUR₁处理较对应R₀处理分别降低6.18%~9.80%、10.41%~18.49%和8.82%~7.32%,早稻除PU处理外均达到显著差异水平,晚稻仅PU处理达到显著差异水平。与CU处理相比,早、晚稻PU和LU处理分别显著降低71.22%~78.27%和35.77%~41.09% ($P<0.05$),PU处理减排效果远优于LU处理。秸秆利用方式与施肥模式的交互作用显著影响早稻和早、晚稻总量NH₃挥发,其中以PU和R₁组合效果最优。

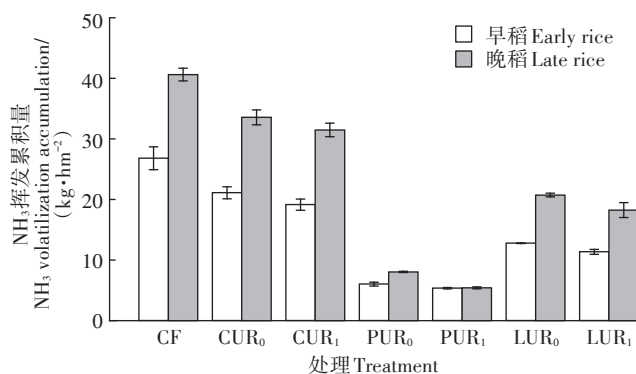
早、晚稻各处理NH₃挥发均集中于施肥前期,施肥后7 d内NH₃挥发累积量分别为5.35~26.80 kg·hm⁻²和5.42~40.62 kg·hm⁻²,占NH₃挥发总量的60.08%~67.24%和52.08%~64.16%(图7)。同时,统计早、晚稻NH₃挥发总量可知,与CF处理的103.18 kg·hm⁻²相比,CUR₀、CUR₁、PUR₀、PUR₁、LUR₀和LUR₁处理NH₃挥发量分别显著降低了15.27%、21.64%、78.55%、81.78%、48.33%和52.41% ($P<0.05$)。与R₀处理相比,R₁处理NH₃挥发总量显著降低8.67% ($P<0.05$)。与

表1 不同秸秆利用方式与施肥模式下稻田NH₃挥发损失总量之间的比较(kg·hm⁻²)Table 1 Changes in cumulative NH₃ volatilization from paddy fields under different straw utilization and fertilization methods(kg·hm⁻²)

秸秆利用方式Straw utilization method	施肥方式Fertilization method	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	合计 Total
R ₀	CF	39.87±2.11	63.31±2.98	103.18±2.67
	CU	32.45±5.16	54.98±4.79	87.42±0.88
	PU	9.37±1.06	12.76±1.85	22.13±0.11
	LU	20.73±2.01	32.58±1.85	53.31±0.36
	平均	22.15±10.73a	33.44±18.32a	54.33±30.19a
R ₁	CU	29.27±3.09	51.58±6.62	80.85±0.37
	PU	8.39±0.86	10.40±1.84	18.79±0.46
	LU	18.90±0.27	30.19±0.55	49.10±0.21
	平均	17.70±8.18b	30.73±17.87a	45.49±25.51b
ANOVA				
秸秆利用方式		**	**	**
施肥模式		**	**	**
秸秆利用方式×施肥模式		**	ns	**

注:表中同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。“ns”表示影响不显著;“**”表示在0.01水平上影响显著。

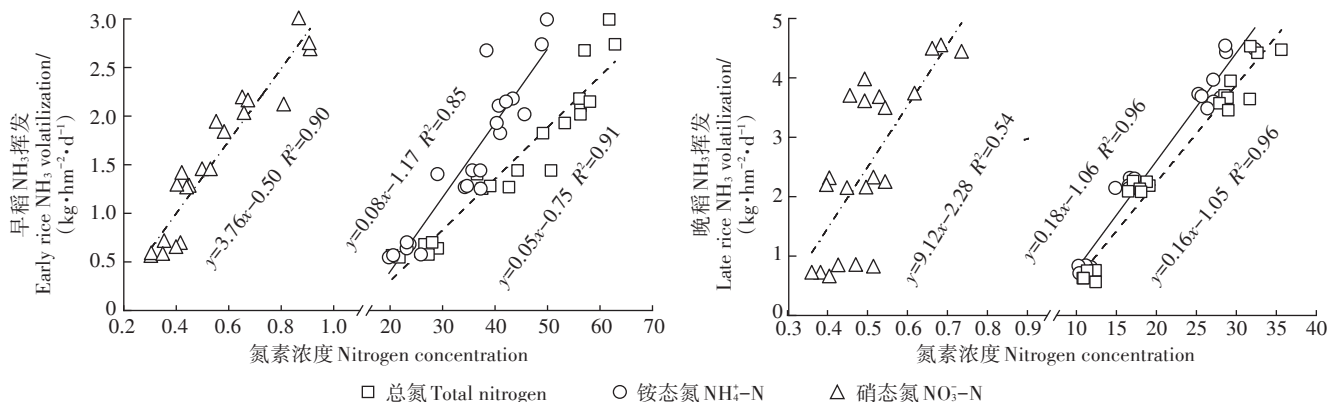
Note: Different lowercase letters in a row mean significant differences at 5% level. “ns”, not significant; ** indicates significant correlation at 0.01.

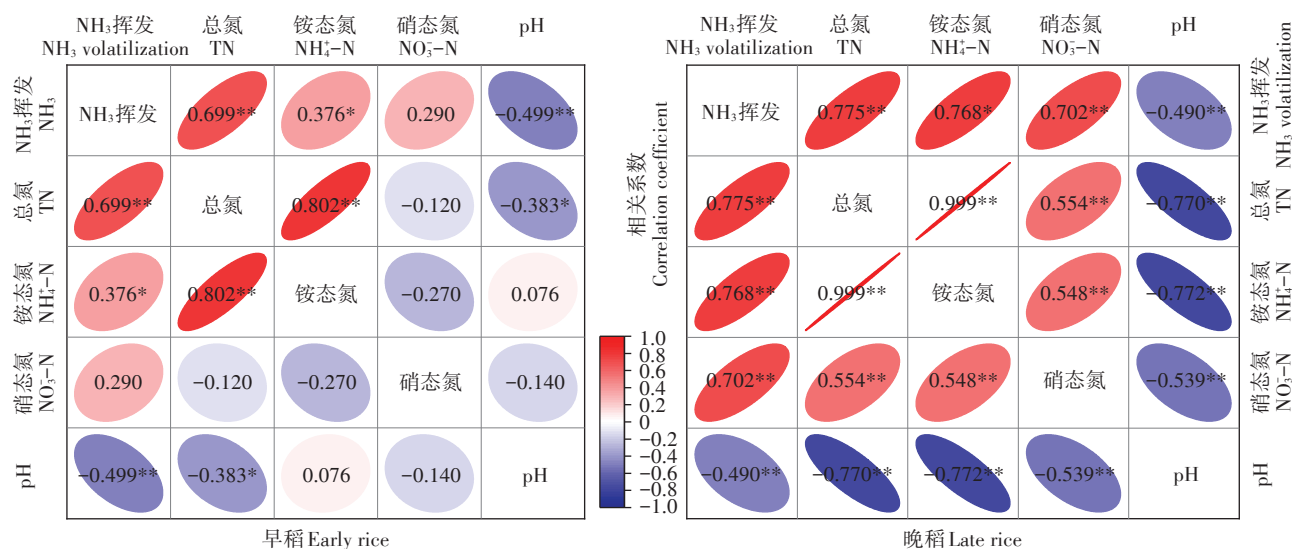
图7 不同处理下稻田施肥后7 d内NH₃挥发累积量的变化Figure 7 Changes in cumulative NH₃ volatilization from paddy fields within 7 days after fertilization under different treatments

CU处理相比,PU和LU处理分别显著降低了75.68%和39.14%,其中PU处理减少NH₃挥发排放效果显著优于LU处理,较LU处理显著降低了60.04% ($P < 0.05$)。

2.2.3 田面水不同形态氮素及pH相关性

如图8所示,平均总氮、NH₄⁺-N以及NO₃⁻-N含量与NH₃挥发平均累积量均呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数高达0.90左右,表明有较高的田面水总氮、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量的处理均很有可能具有较高的NH₃挥发累积量。但比较早、晚稻各处理施肥后15 d内的NH₃挥发日通量与对应田面水中氮素含量相关性(图9)发现,早稻田面水中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量与NH₃挥发日通量相关系数相对较低,仅NH₄⁺-N达显著

图8 NH₃挥发累积量与田面水总氮、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的相关性分析($P < 0.01$)Figure 8 Correlation analysis between the NH₃ volatilization accumulation and total nitrogen, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in field water($P < 0.01$)



**代表在0.01水平上显著相关,*代表在0.05水平上显著相关

**indicates significant correlation at 0.01,*indicates significant correlation at 0.05

图9 NH₃挥发日通量与田面水总氮、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和pH的相关性分析

Figure 9 Correlation analysis of total nitrogen, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, pH and NH₃ volatilization rate

正相关($P < 0.05$)。

如图9所示,早、晚稻季施肥后15 d内的田面水pH与对应NH₃挥发日通量均呈显著负相关性。这是由于施肥后,早、晚稻田面水总氮和NH₄⁺-N浓度均迅速增加,达到峰值后又迅速降低,稻田NH₃挥发通量呈现出同样的动态规律,而田面水pH迅速上升后一直处于较高值并保持稳定,且监测期未产生回落。比较田面水中不同形态氮素之间的相关性发现,早、晚稻田面水中每日NH₄⁺-N与总氮浓度呈现极显著正相关,说明施肥后田面水中总氮的主要形态是NH₄⁺-N。而田面水中NO₃⁻-N含量表现不一致,早稻田面水中NO₃⁻-N含量与总氮和NH₄⁺-N含量均为负相关,而晚稻均为极显著正相关。田面水中NH₄⁺-N通过硝化作用转变为NO₃⁻-N,NO₃⁻-N为硝化作用的主要氮素产物,因此与NH₄⁺-N呈现负相关性,而晚稻呈现极显著正相关,可能是由于晚稻前期的高温改变了土壤中氮素向水体的运输和水体中NH₄⁺-N向NH₃转变的复杂过程,或者解释为田面水NH₄⁺-N浓度越高,硝化作用越强烈,因此相应转化为NO₃⁻-N的浓度也越高。

3 讨论

3.1 稻田NH₃挥发的季节性差异

NH₃挥发受施氮方式、氮肥种类和土壤理化性状等多种因素影响^[9,28-29]。ZHONG等^[30]、CAO等^[20]和田昌等^[7]的研究指出,氮肥深施、秸秆还田和缓控释肥

可降低NH₃挥发速率,同时推迟NH₃挥发速率峰值的出现,从而降低NH₃排放。本研究发现,早、晚稻不同处理之间NH₃挥发速率差异较大,深施、秸秆还田和缓控释肥均可显著降低NH₃挥发的产生,但NH₃挥发速率峰值出现的时间与常规处理一致,与上述研究结果存在差异,可能是气温、风速及降雨等因素的干扰,导致其推迟NH₃挥发峰值作用受限^[7,31]。从图6可以看出,早、晚稻分别于4月29日、5月1日和8月4日、8月8日出现波动,再次出现峰值,其中晚稻较早稻更为明显。早稻峰值的出现主要是由于4月28日伴随强降雨气温骤减,抑制了NH₃挥发的产生,而5月1日温度的迅速抬升,加剧了NH₃挥发的产生。晚稻峰值的出现可能归结于田间灌溉,晚稻温度较高,蒸发量较大,试验期间8月4日和8月8日水层较浅,且均在NH₃挥发监测完毕后给每个小区进行了灌水,较浅的水层可能提高了田面水NH₄⁺的浓度,在高温下其迅速以NH₃的形式挥发。相关研究表明,降雨和灌溉可通过下渗作用将氮素带入土壤深处,这不仅能加强土壤胶体对NH₄⁺的吸附,还能增加田面水深度、土壤含水量,从而降低土壤溶液/田面水中NH₄⁺浓度,同时较高的含水量造成土壤通透性和气体扩散性较差,阻碍土壤中NH₃的扩散,进一步抑制了NH₃的挥发^[12,32-34]。

通过比较水稻不同种植季节的NH₃挥发损失占比可以发现,晚稻各处理平均NH₃挥发损失占双季稻总量的63.54%,远高于早稻的36.46%(表1),这主要

是由于晚稻施肥期温度较高且降雨较少,有利于尿素水解,导致田面水 NH_4^+ 浓度和 pH 上升较快,同时高温又进一步加剧 NH_3 挥发^[35-37]。 NH_3 挥发消耗 NH_4^+ 和 OH^- , 使 pH 趋于下降,这也可以解释晚稻田面水 NH_4^+ 和 pH 上升较快,回落也较快的原因。比较稻田 NH_3 挥发产生的主要时期可以发现,早、晚稻各处理 NH_3 挥发均集中于水稻生长前期,施肥后 7 d 内 NH_3 挥发量占总量的 64.52% 和 61.79% (图 4)。这可能是由于施肥后一周水稻植株较小,吸收氮素能力有限^[26-27],同时稀疏的水稻冠层透光、透风的环境有利于 NH_3 挥发^[28-29]。

3.2 影响稻田氮素挥发损失的关键因子

NH_3 挥发是稻田氮素损失的主要途径,约占施氮量的 9%~40%^[6,38]。本研究发现,不同处理之间早、晚稻 NH_3 挥发损失总量差异较大,氮挥发损失量占施肥量的 6.26%~28.66%,其中常规施肥模式下早、晚稻 NH_3 发量最大,分别为 39.87 和 63.31 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,损失率分别为 22.15% 和 35.17%,与朱坚等^[35]和田昌等^[7]的研究结果相近。较常规施肥,深施、秸秆还田和缓控释肥均显著降低了稻田 NH_3 挥发(表 1)。究其原因均是从某些方面实现了氮素的缓释化,阻碍尿素水解、增强土壤对 NH_4^+ 吸附或转变 NH_4^+ 为其他形态氮素,降低了土壤溶液/田面水中 NH_4^+ 浓度,从而减少了 NH_3 的挥发。本试验表明无论在何种施肥模式下,双季稻田面水中平均总氮、 NH_4^+-N 以及 NO_3^--N 浓度均与 NH_3 挥发累积量之间存在极显著正相关关系,与前人的研究结果相似^[38-39]。此外,相关研究表明,尿素水解导致初期田面水 pH 迅速升高, NH_3 挥发和硝化作用使 pH 逐渐下降^[12,40],氮肥深施和缓控释肥虽降低了氮肥水解速率,有效缓解了田面水 pH 的剧烈上升,但整体 pH 动态规律与常规尿素保持一致,呈现先增后降的趋势。与上述研究结果不同,本试验在监测期内,各施肥处理田面水 pH 上升后趋于稳定,并始终未出现回落,且各施肥管理措施与常规处理之间 pH 无显著差异。究其原因主要分为两个方面:一方面,本试验各处理均采用一次性基施的施肥方式,pH 上升均较快,常规尿素处理虽水解较快,但 NH_3 挥发剧烈消耗了大量 OH^- ,因此各处理 pH 差异不显著,同时后期由于大量 NH_4^+ 仍被土壤胶体所吸附, OH^- 保留在田面水中,因此使田面水 pH 持续上升^[41];另一方面,本试验监测期内观察到水层漂浮着大量藻类生物,田面水丰富的营养物质有利于藻类光合作用的进行,引起田面水 pH 持续上升,同时减少了各处理之间 pH 的差异^[42-43]。

总之,田面水 pH 受多种因素的综合影响,温度、降雨、灌溉以及土壤理化性状均可以改变田面水 pH^[44-45]。

研究表明,氮肥深施增加氮肥颗粒与土壤的接触,降低氮肥水解速率,使土壤吸附更多的 NH_4^+ ^[10,46],延长氮素有效期实现氮肥的缓释化,进而降低田面水中 NH_4^+ 浓度和 pH。本研究指出,深施一定程度降低了田面水 NH_4^+ 浓度,早、晚稻 NH_3 挥发损失率分别降低了 18.61% 和 15.30%,对田面水 pH 的降低无明显作用,这与周平遥等^[47]和 ZHONG 等^[30]的研究结果相似,但与 YAO^[10]和 PAN 等^[11]有减排效果的结果差异较大。其原因在于深施的方式及深度的不同,从而对土壤/田面水 NH_4^+ 浓度及 pH 影响不同,施肥深度越深, NH_3 挥发控制效果越好,大颗粒球肥深施较条施效果更好,而机械侧深施可能又有所差异^[46-47]。此外,深施还可以解决当前缓控释肥密度较低,表施易漂浮在水面产生富营养化的问题^[16,48]。研究发现,缓控释肥侧深施可显著降低稻田土壤 NH_3 挥发,以树脂包膜一次性基施效果最佳,较常规化肥分次施肥处理可减排 84.77%^[16]。周丽平等^[49]的研究发现,4 种缓控释肥一次性基施与常规尿素相比第 1 年和第 2 年可分别减少 21.7%~64.6% 和 17.3%~57.2% 的 NH_3 挥发,其中树脂包膜尿素与控释尿素之间差异不显著。本研究结果表明,早、晚稻整个生长季树脂包膜尿素减量和控释尿素减量处理较尿素处理的氮挥发损失量降低 75.68% 和 39.14%,降幅显著,其中包膜尿素减排效果远优于控释尿素。通常 NH_3 挥发损失量与施氮量呈显著指数相关性^[4,50],但本试验缓控释肥仅减氮 20% 却使 NH_3 挥发受到大幅抑制,显然不仅是减肥措施造成的,其主要原因是两种缓控释肥的添加。包膜尿素表面的包膜材料可有效阻止土壤水分、脲酶与膜内尿素直接接触,延长尿素的水解速率,进而减少了参与 NH_3 挥发的底物(尿素态氮)含量^[39,51-52];控释尿素中的控释材料为复杂网状结构,可与土壤颗粒形成微团聚体,产生丰富的吸附位点,减缓氮素向土壤溶液的释放,从而抑制 NH_3 的挥发^[53-56]。本试验树脂包膜尿素和控释尿素田面水 NH_4^+-N 浓度差异较大,减排效果差异较大,与周丽平等^[49]的研究结果不同。分析其原因可能与不同地区的气候、降雨、施肥量及施肥方法不同有关,研究认为缓控释肥的缓释效果极易受土壤水分和温度的影响^[16,57-58]。

当前,秸秆施用对稻田 NH_3 挥发的影响存在较大差异,有的结果甚至截然相反。有研究表明秸秆还田可以提高有机质含量和阳离子交换量,增加土壤胶体

对 NH_4^+ 的吸附^[19-20]。同时,秸秆通过调节土壤碳氮比,促进水稻生长和微生物活性,进而有利于硝化作用和有机氮固持的发生^[19-21],减少土壤 NH_4^+ 浓度,抑制 NH_3 的挥发。但也有研究认为,秸秆降解过程中产生的有机基团会中和酸根离子,提高土壤/田面水 pH ^[22-23],同时微生物活性的提高可能会迅速加快氮肥水解,大幅提高田面水 NH_4^+ 浓度和 pH ,从而促进 NH_3 的挥发^[24-25]。本研究结果表明,秸秆还田在一定程度上降低田面水 NH_4^+-N 浓度,减少7.52%~15.07%的 NH_3 挥发,对田面水 pH 则无明显影响,与前人研究结果相似^[20]。总之,秸秆具有改善土壤氮素供给和水稻养分需求关系的作用,是氮素缓释化的一种体现,不同研究结果造成的差异可能与气候、降雨、施肥方法和秸秆自身性质及还田方式的不同有关,而其关键可能在于是否增加了田面水 pH ^[19,23,26]。此外,本研究秸秆利用方式与施肥模式对早稻 NH_3 挥发有显著的互作效应(表1),而对晚稻无显著的互作效应。研究认为,微生物在秸秆腐解的过程中起主导作用^[59]。早稻土壤温度较为适宜,蒸发量较低,降水量较大,导致土壤含水量较高,有利于微生物对秸秆的腐解,从而促进秸秆调节土壤氮素供给和水稻养分需求关系^[60]。晚稻前期温度较高,降雨较少, NH_3 挥发量大,水稻与微生物氮素竞争较为激烈,微生物的活力受到水分和氮素的限制,秸秆腐解较慢,减弱了秸秆还田对 NH_3 挥发的控制效果,从而导致了晚稻秸秆还田与施肥模式互作效应降低^[59,61]。总之,本研究结果表明,秸秆利用方式与施肥模式对早、晚稻 NH_3 挥发总量有显著的互作效应,说明合理的秸秆利用方式与施肥模式配合使用对于降低 NH_3 挥发有一定效果,其中秸秆与包膜尿素或控释尿素减量深施是一个有效降低 NH_3 挥发的施肥管理措施,均显著降低了早、晚稻田的 NH_3 挥发损失。

4 结论

在南方双季稻种植模式下,深施和秸秆利用方式显著影响 NH_3 挥发,但对田面水氮素浓度影响较小。与常规尿素撒施处理相比,尿素深施 NH_3 挥发显著降低了15.3%;与秸秆移除处理相比,秸秆还田处理 NH_3 挥发显著降低了8.67%。施肥模式显著影响 NH_3 挥发和田面水氮素浓度,两种缓控释肥减量深施处理均具有相对较低的 NH_3 挥发和氮素浓度水平,其中包膜尿素效果远优于控释尿素。秸秆利用方式与施肥管理交互作用显著,秸秆还田可以提高包膜尿素的减排

能力。与秸秆移除+包膜尿素减量深施处理相比,添加秸秆可相应减少15.07%的 NH_3 挥发损失。本研究结果表明,减量深施+包膜尿素与秸秆配施是一项有效降低 NH_3 挥发、缓解水质富营养化威胁的可持续发展农业措施,但未能有效控制田面水 pH 迅速上升的原因仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839. LIU Z H, WU X B, TAN D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827-3839.
- [2] WANG W Q, CHEN Q, HUSSAIN S, et al. Pre-sowing seed treatments in direct-seeded early rice: Consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under chilling stress[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19637.
- [3] DING W C, HE P, ZHANG J J, et al. Optimizing rates and sources of nutrient input to mitigate nitrogen, phosphorus, and carbon losses from rice paddies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120603.
- [4] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1129-1138. ZHU J, SHI L H, TIAN F X, et al. Responses of ammonia volatilization to nitrogen application amount in typical double cropping paddy fields in Hunan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1129-1138.
- [5] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51-56. LI J M, XU M G, QIN D Z, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2005, 11(1): 51-56.
- [6] DONG Y B, WU Z, ZHANG X, et al. Dynamic responses of ammonia volatilization to different rates of fresh and field-aged biochar in a rice-wheat rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 241: 107568.
- [7] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 387-397. TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(4): 387-397.
- [8] LIU X D, CHEN L Y, HUA Z L, et al. Comparing ammonia volatilization between conventional and slow-release nitrogen fertilizers in paddy fields in the Taihu Lake region[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(8): 8386-8394.
- [9] 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.
- [10] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for min-

- imizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218:254–266.
- [11] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232:283–289.
- [12] 吴凡, 张克强, 谢坤, 等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1735–1742.
- WU F, ZHANG K Q, XIE K, et al. Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1735–1742.
- [13] 李艳勤, 刘刚, 红梅, 等. 优化施肥对河套灌区氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2):578–584.
- LI Y Q, LIU G, HONG M, et al. Effect of optimized nitrogen application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in Hetao irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2):578–584.
- [14] JIANG C Q, LU D J, ZU C L, et al. Root-zone fertilization improves crop yields and minimizes nitrogen loss in summer maize in China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):15139.
- [15] 徐明岗, 李菊梅, 李冬初, 等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(5):1010–1015.
- XU M G, LI J M, LI D C, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5):1010–1015.
- [16] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓释侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. 环境科学, 2017, 38(12):5326–5332.
- HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12):5326–5332.
- [17] 怀燕, 陈照明, 张耿苗, 等. 水稻侧深施肥技术的氮肥减施效应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(2):217–224.
- HUAI Y, CHEN Z M, ZHANG G M, et al. Nitrogen reduction effect of side-deep placement of fertilizer on the rice production[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2020, 46(2):217–224.
- [18] 刘威, 周剑雄, 谢媛圆, 等. 控释尿素条施深度对鲜食玉米田间氨挥发和氮肥利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1295–1302.
- LIU W, ZHOU J X, XIE Y Y, et al. Ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in the field of fresh edible maize as affected by different band fertilization depths of controlled-release urea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1295–1302.
- [19] 常菲, 红梅, 武岩, 等. 灌溉方式和改良措施对河套灌区盐渍土氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2):38–45.
- CHANG F, HONG M, WU Y, et al. Effects of irrigation methods and improvement measures on ammonia volatilization of saline soil in Hetao irrigation area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2):38–45.
- [20] CAO Y S, SUN H F, ZHANG J N, et al. Effects of wheat straw addition on dynamics and fate of nitrogen applied to paddy soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178:92–98.
- [21] 李飞, 王俊卿, 梁斌, 等. 施用不同有机物料对设施菜地土壤氮素淋溶损失的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(增刊1):256–261.
- LI F, WANG J P, LIANG B, et al. Effects of different organic materials on nitrogen leaching loss in greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(Suppl 1):256–261.
- [22] 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 M Y, WANG X G, XU X F, 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] XU S S, HOU P F, XUE L H, et al. Treated domestic sewage irrigation significantly decreased the CH_4 , N_2O and NH_3 emissions from paddy fields with straw incorporation[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 169:1–10.
- [26] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 不同施肥管理对东北黑土区氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9):1816–1823.
- YAN L, WANG Y, FENG G Z, et al. Effect of different fertilization management on nitrogen loss in black soils in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1816–1823.
- [27] 孙会峰, 周胜, 付子轼, 等. 秸秆与缓释肥配施对水稻产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4):95–98.
- SUN H F, ZHOU S, FU Z S, et al. Effects of application of controlled release fertilizer combined with wheat straw on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *China Rice*, 2015, 21(4):95–98.
- [28] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氨挥发损失及减排技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1):16–25.
- XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Ammonia volatilization loss and emission reduction measures in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1):16–25.
- [29] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9):3051–3058.
- ZHOU W, LÜ T F, YANG Z P, et al. Research advances on regulating soil nitrogen loss by the type of nitrogen fertilizer and its application strategy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9):3051–3058.
- [30] ZHONG X M, XUAN Z. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306:107183.
- [31] 庄源益, 戴树桂, 张明顺. 水中氨氮挥发影响因素探讨[J]. 环境化学, 1995, 14(4):343–346.
- ZHUANG Y Y, DAI S G, ZHANG M S. The discussion about factors which influence the volatilization of am-

- monia nitrogen in water[J]. *Environmental Chemistry*, 1995, 14(4): 343–346.
- [32] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324–332. TIAN G M, CAI Z C, CAO J L, et al. Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 324–332.
- [33] SUN H J, DAN A, FENG Y F, et al. Floating duckweed mitigated ammonia volatilization and increased grain yield and nitrogen use efficiency of rice in biochar amended paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124532.
- [34] YANG Y, LI N, NI X Y, et al. Combining deep flooding and slow-release urea to reduce ammonia emission from rice fields[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 1–11.
- [35] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 典型双季稻田基施碳酸氢铵和尿素的氨挥发损失研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2): 83–88. ZHU J, SHI L H, TIAN F X, et al. Ammonia volatilization loss from typical double-cropping paddy field with basal application of ammonium bicarbonate and urea[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(2): 83–88.
- [36] 周旋, 吴良欢, 董春华. 生化抑制剂组合对黄泥土土壤氨挥发及累积特性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1081–1088. ZHOU X, WU L H, DONG C H, et al. Effects of combined biochemical inhibitors on ammonia volatilization and cumulation in yellow clayey soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1081–1088.
- [37] ZHOU F, PHILIPPE C, KENTARO H, et al. Re-estimating NH_3 emissions from Chinese cropland by a new nonlinear model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2): 564–572.
- [38] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式对氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682–1689. YU Y L, XUE L H, YANG L Z. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682–1689.
- [39] 邬刚, 袁嫚嫚, 曹哲伟, 等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式对稻田氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 285–288, 331. WU G, YUAN M M, CAO Z W, et al. Study on the ammonia volatilization under different nitrogen schemes from paddy field in Jianghuai hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 285–288, 331.
- [40] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2102–2112. HUANG S Y, TIAN C, XIE G X, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2102–2112.
- [41] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2521–2530. JI X H, ZHENG S X, LU Y H, et al. Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer application regulation in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2521–2530.
- [42] HUDA A, GAIHRE Y K, ISLAM M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 104(1): 53–66.
- [43] 郑圣先, 聂军, 熊金英, 等. 控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 11–16. ZHENG S X, NIE J, XIONG J Y, et al. Study on role of controlled-release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2001, 7(1): 11–16.
- [44] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85–93. WU P P, LIU J J, YANG X X, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-cropping rice field in red soil region[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(1): 85–93.
- [45] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5383–5390. SI L L, ZHOU J J, WU L H, et al. Dynamics and runoff losses of nitrogen in paddy field surface water under combined application of biochar and slow/controlled-release fertilizer[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5383–5390.
- [46] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90.
- [47] 周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2683–2691. ZHOU P Y, ZHANG Z, WANG H, et al. Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2683–2691.
- [48] 侯朋福, 薛利祥, 周玉玲, 等. 掺混控释肥侧深施对稻田面水氮素浓度的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 16–21. HOU P F, XUE L X, ZHOU Y L, et al. The effect of side deep fertilization for resin blending controlled-release fertilizer on nitrogen concentration in surface water of paddy field[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(1): 16–21.
- [49] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1449–1457. ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1449–1457.
- [50] CUI Z L, WANG G L, YUE S C, et al. Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5780–5787.
- [51] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 49–52. DU J J, WU Y L, TIAN J L, et al. Effect of several controlled/slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 49–52.
- [52] KE J, XING X M, LI G G, et al. Effects of different controlled-release

- nitrogen fertilisers on ammonia volatilisation, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205:147–156.
- [53] NI X Y, WU Y J, WU Z Y, et al. A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(3):274–282.
- [54] CAI D Q, WU Z Y, JIANG J, et al. Controlling nitrogen migration through micro-nano networks[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:3665.
- [55] 张晓冬, 史春余, 隋学艳, 等. 基质肥料缓释基质的筛选及其氮素释放规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2):62–66. ZHANG X D, SHI C Y, SUI X Y, et al. Screening of slow releasing substrate of matrix-based fertilizer and its nitrogen release mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2):62–66.
- [56] 吴林, 蔡冬清, 乔菊, 等. 控释氮肥控制氮素径流损失效果研究[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(24):30–31, 21. WU L, CAI D Q, QIAO J, et al. Research on the control of soil nitrogen runoff effect on controlling nitrogen loss[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(24):30–31, 21.
- [57] GRANT C A, WU R, SELLES F, et al. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding[J]. *Field Crops Research*, Amsterdam, 2012, 127:170–180.
- [58] 杨春蕾, 袁玲, 李英才, 等. 南太湖流域控释包膜尿素对水稻产量及稻田氮素流失的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(1):184–190. YANG C L, YUAN L, LI Y C, et al. Effect of controlled release coated urea on rice yield and nitrogen loss in paddy fields in the south Taihu basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(1):184–190.
- [59] 徐英德, 孙良杰, 汪景宽, 等. 还田秸秆氮素转化及其对土壤氮素转化的影响[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(5):859–870. XU Y D, SUN L J, WANG J K, et al. Nitrogen transformation of returned straw in soil and its effect on soil nitrogen transformation[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(5):859–870.
- [60] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同条件下有机物料在黑土中分解规律的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7):152–155. KUANG E J, CHI F Q, ZHANG J M, et al. Decomposed regularity of organic materials under different condition in black soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(7):152–155.
- [61] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9):212–219. CAO Y F, ZHANG H, LIU K, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9):212–219.