

增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响

蒋东, 章力干, 齐永波, 朱荣, 程林, 疏晴, 张富源, 邵红建

引用本文:

蒋东, 章力干, 齐永波, 等. 增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1342–1350.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1252>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮掺杂碳纳米子施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响

胡伟, 向建华, 向言词, 周练, 陈燕

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1378–1385 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0520>

太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践

闵炬, 孙海军, 陈贵, 姜振萃, 陆扣萍, 纪荣婷, 施卫明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2418–2426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1287>

长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响

刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 王芳, 赵天成, 陈晨, 洪瑜

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 947–954 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.018>

不同氮钾水平及氮形态差异对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响

夏淑洁, 刘闯, 袁晓良, 李俊雅, 李林洋, 张润琴, 李志国

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1122–1129 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1220>

一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估

王强, 姜丽娜, 潘建清, 马军伟, 叶静, 邹平

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 168–175 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0204>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蒋 东, 章力干, 齐永波, 等. 增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1342–1350.

JIANG Dong, ZHANG Li-gan, QI Yong-bo, et al. Effects of synergistic compound fertilizer combined with nitrogen reducing application on loss of nitrogen in paddy water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1342–1350.



开放科学 OSID

增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响

蒋 东, 章力干*, 齐永波, 朱 荣, 程 林, 疏 晴, 张富源, 郜红建

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要:通过田间试验研究氨基酸、腐植酸和海藻酸增效复合肥减氮施用对稻田水氮素动态特征和损失的影响,旨在为增效复合肥环境效应评价提供依据。试验设7个处理:不施肥(CK)、不施氮(PK)、常规施肥(CF)、常规施肥减氮20%(CR)、腐植酸复合肥减氮20%(HR)、氨基酸复合肥减氮20%(AR)、海藻酸复合肥减氮20%(SR)。采集水稻生长期不同时间的田面水、径流水和田间渗漏水,分析了不同形态氮素浓度的动态特征和氮素损失。结果表明:增效复合肥减氮处理(AR、HR和SR)明显降低了田面水TN和 NH_4^+-N 浓度峰值,峰值分别维持在 $37.1\sim 49.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $26.0\sim 28.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以SR处理田面水TN和 NH_4^+-N 浓度峰值最低,较CR处理分别降低了38.4%和14.3%,其他减肥处理之间未见显著差异;施肥一周后,田面水TN与 NH_4^+-N 浓度逐渐降低至峰值的15%后趋于稳定;各施肥处理 NO_3^--N 浓度变幅较小,峰值未见明显差异。SR处理0~20 cm土层渗漏水TN浓度最低为 $16.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,较CR、HR和AR处理分别降低了60.8%、50.1%和54.0%,氮素形态以 NH_4^+-N 为主,随土层深度增加,渗漏水TN和 NH_4^+-N 递减。施氮肥处理的氮素流失率大小顺序依次为 $\text{CF}>\text{CR}>\text{HR}>\text{AR}>\text{SR}$,SR处理氮素径流损失量最低为 $6.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较CR处理降低了58.5%;增效复合肥氮素减施均明显降低氮素渗漏损失,施氮肥处理氮素淋失率大小顺序依次为 $\text{AR}>\text{CF}>\text{CR}>\text{HR}>\text{SR}$,SR处理渗漏损失最低为 $7.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较CR处理氮素淋失率降低了18.1%;稻田水氮素损失总量也以SR处理为最低,达 $13.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较CR处理降低了22.8%。研究表明,增效复合肥减氮施用对稻田田面水、土壤渗漏水不同形态氮素浓度有明显影响,可减少稻田水氮素损失风险,以海藻酸增效复合肥减氮处理效果最佳。

关键词:增效复合肥;减氮;稻田;氮素浓度;径流;渗漏

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)06-1342-09 doi:10.11654/jaes.2019-1252

Effects of synergistic compound fertilizer combined with nitrogen reducing application on loss of nitrogen in paddy water

JIANG Dong, ZHANG Li-gan*, QI Yong-bo, ZHU Rong, CHENG Lin, SHU Qing, ZHANG Fu-yuan, GAO Hong-jian

(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To evaluate the environmental effects of synergistic compound fertilizer application in paddy fields, a field experiment was conducted to explore the effects of amino acid, humic acid, and alginic acid synergistic compound fertilizer combined with a nitrogen reducing application on the dynamic characteristics and loss of nitrogen in paddy water. Seven treatments were used: no fertilization (CK), no nitrogen application (PK), conventional fertilization (CF), conventional fertilization reducing nitrogen 20% (CR), humic acid synergistic compound fertilizer reducing nitrogen 20% (HR), amino acid synergistic compound fertilizer reducing nitrogen 20% (AR), and alginic acid synergistic compound fertilizer reducing nitrogen 20% (SR). The dynamic characteristics and loss of nitrogen in paddy water were analyzed by surface, runoff, and leakage water collected at different times during the rice-growing season. The results showed that: the peak values of

收稿日期:2019-11-14 录用日期:2020-03-03

作者简介:蒋 东(1993—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为新型肥料的推广与应用。E-mail:1071112939@qq.com

*通信作者:章力干 E-mail:zhligan@ahau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200402,2018YFD0800301)

Project supported: National Key R&D Program of China(2016YFD0200402,2018YFD0800301)

the concentrations of TN and NH_4^+-N in the surface water reduced significantly by the treatments of AR, HR, and SR. The peak values of TN and NH_4^+-N concentrations were $37.1\sim 49.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $26.0\sim 28.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Among four reducing nitrogen fertilization treatments, the peak values of TN and NH_4^+-N concentrations of the SR treatment were the lowest, which decreased 38.4% and 14.3% compared with the values in the CR treatment, respectively. There were no obvious differences in the other three nitrogen reducing fertilization treatments. One week after fertilization, the concentrations of TN and NH_4^+-N in the surface water gradually decreased to reach stability (approximately 15% of the maximum values). The concentrations of NO_3^--N in the surface water were generally low in each treatment and no obvious differences were observed. In soil depths of 0~20 cm, the lowest concentration of TN in the leakage water was observed in the SR treatment ($16.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), which decreased 60.8%, 50.1% and 54.0% compared to that in CR, HR and AR treatments, respectively. The TN concentration in leakage water decreased with the increase of soil depth, in which NH_4^+-N occupied a major proportion. The order of the loss rate was $\text{CF}>\text{CR}>\text{HR}>\text{AR}>\text{SR}$, in which the runoff of the SR treatment was the lowest ($6.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and its loss rate decreased 58.5% compared with that of the CR treatment. Moreover, the nitrogen leakage was significantly reduced in the three synergistic compound fertilizer treatments. The order of the leaching rate was $\text{AR}>\text{CF}>\text{CR}>\text{HR}>\text{SR}$, in which the leakage of the SR treatment was the lowest ($7.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); its leaching rate decreased 18.1% compared to that of the CR treatment. Furthermore, the total loss of nitrogen in the SR treatment was the lowest ($13.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and its loss decreased by 22.8% compared to that of the CR treatment. In conclusion, these findings show that the concentrations of the different nitrogen forms in the surface and leakage water were significantly influenced by the treatments of synergistic compound fertilizer combined with a nitrogen reducing application, which can be an effective way to alleviate the risk of nitrogen loss through paddy water, especially by the treatment of an alginic acid synergistic compound fertilizer combined with a nitrogen reducing application.

Keywords: synergistic compound fertilizer; reduction of nitrogen; paddy fields; nitrogen concentration; runoff; leakage

化肥是提高作物单产和保障粮食安全的重要物质基础。化肥施用在提升作物产量的同时,也为农业环境带来日趋严重的压力。2014年我国单位面积化肥施用量约是世界平均水平的3.9倍^[1],氮肥利用率仅为30%~35%^[2]。据报道,太湖流域稻季经淋失和挥发损失的化肥氮素超过施入氮素的30%~50%,化肥氮素损失成为农业面源污染的重要来源^[3]。研究表明,应用新型肥料和氮肥减施增效技术能在不降低产量的前提下明显降低稻田的径流和氮素渗漏损失,达到减轻农业面源污染的目的^[4-6]。近年来,利用腐植酸、氨基酸、海藻酸等增效载体研制新型增效复合肥的技术快速发展,相关新型肥料产品生产与应用也迅速增加,有关增效载体与增效复合肥的提质增效作用越来越受到人们的关注^[7-10]。前人已在腐植酸、氨基酸、海藻酸复合肥对作物的生长、产量、品质、氮素吸收利用等方面进行了较多研究^[11-13],表明此类新型增效复合肥均能不同程度促进作物生长发育、提高作物产量、改善农产品品质和促进氮素的吸收利用。目前的有关研究均围绕增效载体对土壤、作物和肥料的系统调控与增效复合肥减量施用技术的作物效应等方面,但关于腐植酸、氨基酸、海藻酸等新型增效复合肥减量施用对稻田氮素流失的影响未见系统报道。本研究从新型增效复合肥减量施用技术入手,探究新型增效复合肥减氮施用对稻田水体中不同形态氮素

浓度及流失量的影响,为增效复合肥的环境效应评价提供理论依据,也为稻田面源污染防治提供技术和产品支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于2018年6—11月在江苏省句容市白兔镇稻麦轮作的田块($31^{\circ}58'05''\text{N}$, $119^{\circ}17'47''\text{E}$)进行。试验地属于北亚热带季风气候区,四季分明,雨水充沛,年平均气温为 15.5°C ,年平均降雨量为 $1\,099.1\text{ mm}$,年平均日照 $1\,999.3\text{ h}$ 。供试土壤为下蜀黄土发育的爽水性水稻土,土壤质地为黏壤土,有机质含量 $11.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.850\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $76.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $11.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $86.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.21(土:水=1:2.5)。

1.2 试验设计

试验设不施肥(CK)、不施氮(PK)、常规施肥(CF)、常规施肥减氮20%(CR)、腐植酸复合肥减氮20%(HR)、氨基酸复合肥减氮20%(AR)、海藻酸复合肥减氮20%(SR)共7个处理,每个处理3次重复。氮素分基肥、分蘖肥和穗肥施用,不同时期氮素施用比例为5:3:2,磷、钾肥全部用作基肥;基肥以不同来源复合肥形式施用,追肥按比例施用尿素。具体处理与施肥量见表1。小区面积 12 m^2 ,每小区土壤分20、

表1 不同处理养分投入量(kg·hm⁻²)
Table 1 Nutrient input of different treatment(kg·hm⁻²)

试验处理 Treatments	养分投入量 Nutrient input		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0
PK	0	75	120
CF	240	75	120
CR	192	75	120
HR	192	75	120
AR	192	75	120
SR	192	75	120

40、60 cm 深度埋设土壤水抽滤器收集渗漏水,用 50 mL 注射器插入抽液软管,手动采集不同深度的渗漏水样以及田面水样。2018 年 6 月 21 日插秧,7 月 9 日施分蘖肥,7 月 20—30 日排水烤田,7 月 30 日施穗肥,10 月 27 日收获,水稻品种为杨宁 1 号,田间管理按照当地农民常规管理方式进行。

1.3 样品采集

每次施肥后的第 2、3、5、7、14 d 上午 8:00—10:00 采集田面水样 250 mL,渗漏水样 100 mL。水稻生长期降水产生径流时,在各小区排水口收集径流水样约 250 mL,并记录降雨量或烤田排水前的田面水深度。采集的水样立即放入 -20 ℃ 冰箱中冷藏待测。用荷兰 SKALAR San++ 连续流动分析仪测定水样中的硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和总氮(TN)。

1.4 数据统计与分析

降雨径流量用 SCS-CN 模型计算^[14]。

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P > 0.2S)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq 0.2S)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

式中: P 为总降雨量, mm; S 为径流开始后的最大入渗量, mm; Q 为径流损失量, mm; CN 为径流曲线值, 是反映降雨前流域特征的一个综合参数, 它与流域前期土壤湿润程度、坡度、植被、土壤类型、土壤利用现状等有关。 CN 的取值范围为 0~100, 表示集水区径流产生的潜力, CN 值越大, 则径流损失量越大。

本研究根据 SCS 提供的基于土壤类型和土地利用 CN 值查表, 并参考相关研究^[15-16]进行校正, CN 值确定为 82。试验区 2018 年稻季共产生 4 次径流, 分别为 6 月 28 日、7 月 2 日、8 月 3 日 3 次降雨, 对应的降

雨量分别为 107.5、103.6、62.6 mm; 7 月 20 日烤田排水 1 次, 当日测得各试验小区淹水平均深度为 5 cm。稻季淹水 89 d。

(1) 烤田排水期径流量 = 排水前淹水深度 × 小区面积

(2) 氮素径流损失量 = 径流水氮素浓度 × 径流量

(3) 氮素径流流失率 = (施氮处理氮素径流损失量 - 不施氮处理氮素径流损失量) / 施氮量 × 100%

(4) 氮素渗漏损失量 = 渗漏水时间间隔加权平均浓度 × 渗漏水量^[17-18]

(5) 渗漏水时间间隔加权平均浓度 = (渗漏水氮浓度 × 采样间隔天数) 之和 / 总采样天数

(6) 渗水量 = 渗水速度 × 水稻生育期浸没天数

(7) 氮素渗漏流失率 = (施氮处理氮素渗漏损失量 - 不施氮处理氮素渗漏损失量) / 施氮量 × 100%

黄沈发等^[19]6 a 的监测结果表明, 黏壤土、轻壤土和砂壤土的稻季渗水速度为 4、6、8 mm·d⁻¹, 据此, 取 4 mm·d⁻¹ 作为本试验的渗水速度。

采用 Microsoft Excel 2009 对数据进行处理, 利用 Origin 8.5 进行分析、绘图, 使用 SPSS 19.0 进行单因素方法分析 (Duncan 多重比法)。

2 结果与分析

2.1 田面水氮素形态及浓度的动态变化

监测期内, 各施肥处理田面水 TN 与 NH₄⁺-N 浓度的变化趋势基本保持一致 (图 1), 分别在施基肥、分蘖肥和穗肥后出现 3 个峰值。HR、AR、SR 处理田面水 TN 与 NH₄⁺-N 浓度均在基施后的第 2 d 达到峰值, 峰值分别维持在 37.1~49.7 mg·L⁻¹ 和 26.0~28.8 mg·L⁻¹, 3 种增效复合肥处理中以 SR 处理田面水 TN 与 NH₄⁺-N 浓度峰值最低, 较 CR 处理峰值分别降低了 38.4%、14.3%。各施肥处理的 NO₃⁻-N 浓度变幅较小, 基施第 2 d 达峰值 0.554~0.633 mg·L⁻¹, 其中 CR 处理较 HR 处理降低了 0.073 mg·L⁻¹, 较 AR、SR 处理分别提高了 0.054 mg·L⁻¹ 和 0.112 mg·L⁻¹, 各处理间 NO₃⁻-N 浓度峰值未见明显差异, 随后各处理 NO₃⁻-N 浓度有降低趋势。施分蘖肥和穗肥后, 田面水 TN 与 NH₄⁺-N 浓度均在第 2~3 d 内达到峰值, 而 NO₃⁻-N 浓度在施肥后 3~5 d 内达到峰值 (0.050~1.75 mg·L⁻¹), 为同期 NH₄⁺-N 浓度峰值的 1.20%~4.79%。从图 1 中还可以看到, 7 月 2 日各施肥处理田面水 NO₃⁻-N 浓度在 7 月 4 日略有上升, 以 CF 处理最高达 1.01 mg·L⁻¹, 这可能与降雨及田间除草扰动了土层有关。

2.2 土壤渗漏液氮素形态及浓度的动态变化

2.2.1 土壤渗漏液TN浓度的动态变化

稻田0~20、20~40、40~60 cm深度土壤渗漏液中TN浓度随土壤深度加深呈下降趋势(图2),

0~20、20~40、40~60 cm土壤14次采样的TN浓度平均值分别为8.04、4.12、2.71 mg·L⁻¹。施入基肥的第

2 d,各处理0~20 cm土层渗漏液TN浓度达到峰值,其中SR处理TN浓度峰值为16.5 mg·L⁻¹,较CR、HR和AR处理分别降低了60.8%、50.1%和54.0%,CF处理TN浓度达48.7 mg·L⁻¹,较CR处理提高了16.1%,说明常规施肥加大了渗漏损失风险,减氮施肥尤其是新型增效复合肥减氮施用能有效降低氮素渗漏风险。稻

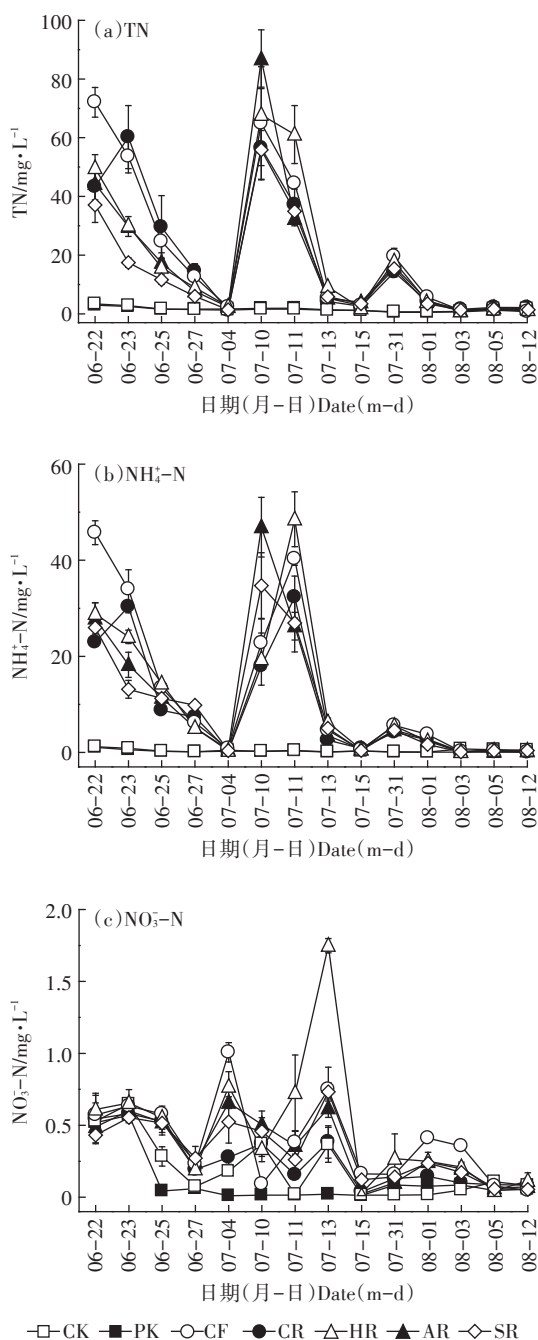


图1 不同施肥处理田面水TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N concentrations in field water treated with different fertilizers

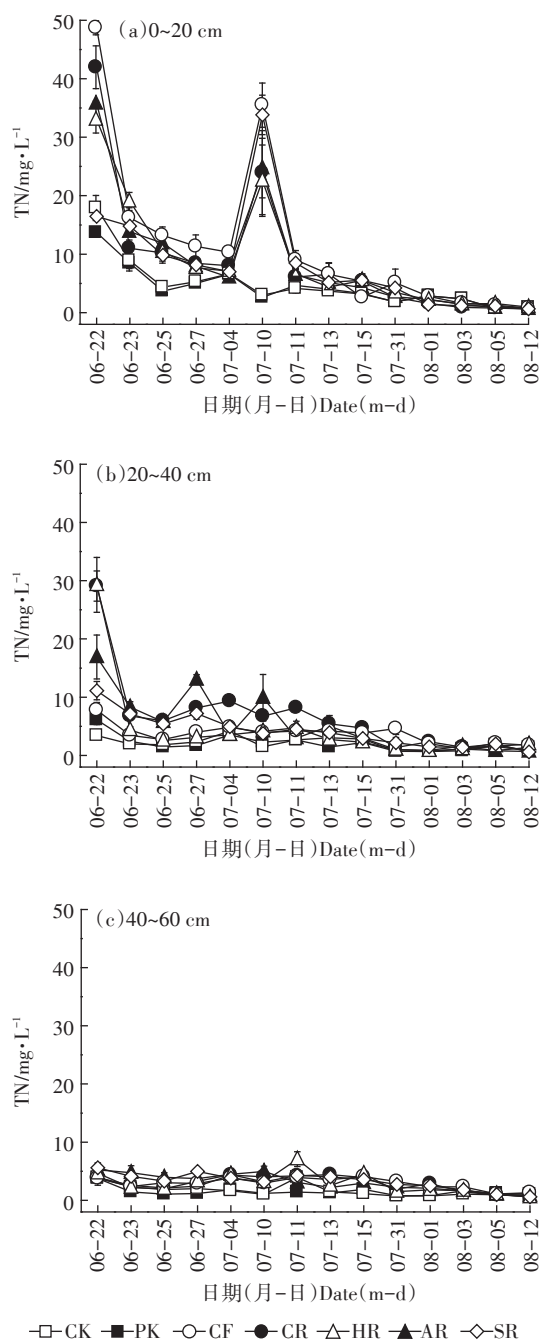


图2 稻田0~20、20~40、40~60 cm深度土壤渗漏液中TN浓度的动态变化

Figure 2 Dynamic change of TN concentration in soil seepage at 0~20, 20~40 and 40~60 cm depths in paddy water

田 20~40 cm 土壤渗漏液 TN 浓度仅在基肥施入后第 2 d 有明显提高,其他时期未见明显差异。稻田 40~60 cm 土壤渗漏液 TN 浓度各处理均未出现显著变化,基本维持在 $0.53\sim 7.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明 TN 垂直迁移主要发生在 40 cm 以内土壤层次,且此深度渗漏液 TN 浓度受施肥量和肥料种类的影响最大。

2.2.2 土壤渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的动态变化

如图 3 所示,随深度(0~20、20~40、40~60 cm)增加,土壤各层渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈下降趋势,14 次采样各土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的平均值分别为 3.50、2.06、 $1.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 0~20 cm 到 20~40 cm 的土层渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降幅度最大达 $1.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。施基肥后,与 TN 浓度变化一致,0~20、20~40 cm 各施肥处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均在第 2 d 达到峰值,其中 0~20 cm 土壤渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度以 CF 处理最高达 $31.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,20~40 cm 土壤渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度以 HR 处理最高达 $17.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,40~60 cm 土壤渗漏液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度受施肥处理的影响不明显。

2.2.3 土壤渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度的动态变化

整个监测期内,稻田 0~20、20~40、40~60 cm 土壤渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度普遍较低(图 4),14 次采样各土层 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度的平均值分别为 0.221、0.110、 $0.070\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,不同土层渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度随深度增加有降低趋势。施基肥和分蘖肥后,稻田 0~20 cm 土壤渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度有所提高,最高达到 $1.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但各处理渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度均较低。施肥对稻田 20~60 cm 土壤渗漏液中 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度未产生明显影响, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度均低于 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,40~60 cm 土壤渗漏液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度小于 $0.500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明 0~60 cm 稻田土壤渗漏液中,氮素存在形态主要是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,硝化作用产生的 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量极少。

2.3 不同施肥处理稻田水的氮素损失

如表 2 所示,不同施肥处理对径流损失、渗漏损失和稻田水氮素损失总量影响明显。各处理稻田水氮素损失总量在 $7.14\sim 20.81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,所有氮素减施处理,稻田水氮素损失总量明显降低,其中 SR 处理氮素损失量最低达 $13.92\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 CF 处理降低了 33.1%,较 CR 处理降低了 22.8%,且 SR 处理与 CR 处理之间存在显著差异($P<0.05$),HR 和 AR 处理与 CR 处理之间差异不显著。稻田水氮素损失途径上不同处理存在明显差异,不同处理氮素径流损失量占稻田水氮素总损失量的比例为 42.6%~54.4%,渗漏损失量占比为 45.6%~57.4%。试验条件下,施肥处理的氮素

流失率大小顺序依次为 $\text{CF}>\text{CR}>\text{HR}>\text{AR}>\text{SR}$ 。其中 CF 处理稻田氮素径流损失量最高为 $11.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,流失率达 3.17%,SR 处理氮素径流损失量最低为 $6.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮素流失率为 1.30%。SR 较 CF 处理氮素流失率降低了 1.87 个百分点,较 CR 处理降低 1.83 个百分点,降幅分别达 59.0% 和 58.5%,和其他施肥处理之间差异显著($P<0.05$)。试验条件下,施肥处理的氮素

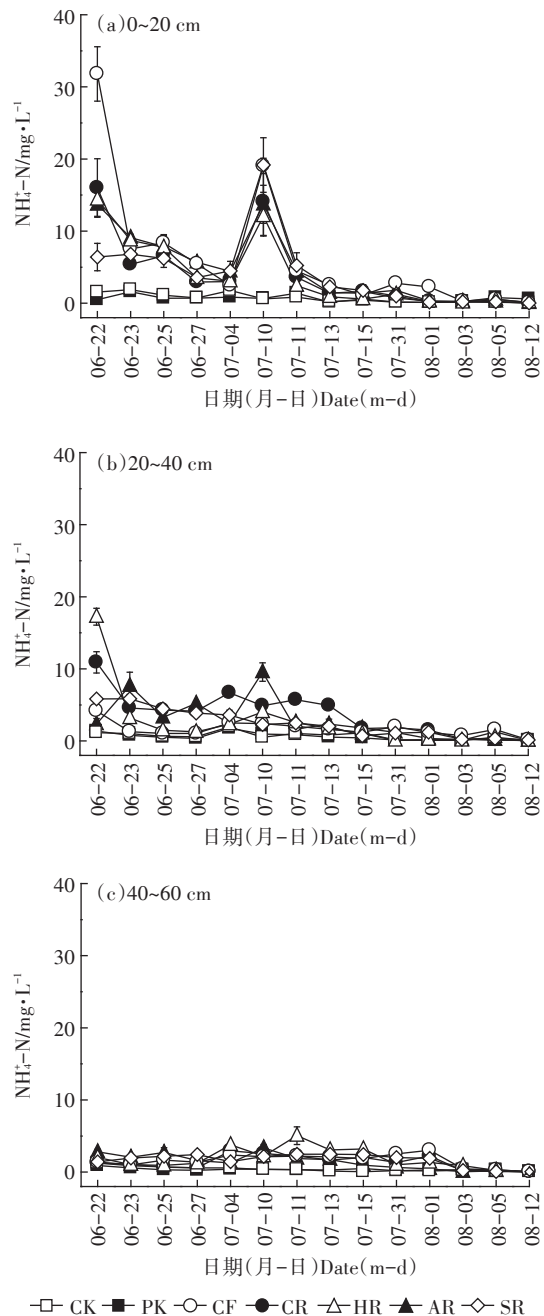


图 3 稻田 0~20、20~40、40~60 cm 深度土壤渗漏液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的动态变化

Figure 3 Dynamic change of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in soil seepage at 0~20, 20~40 and 40~60 cm depths in paddy water

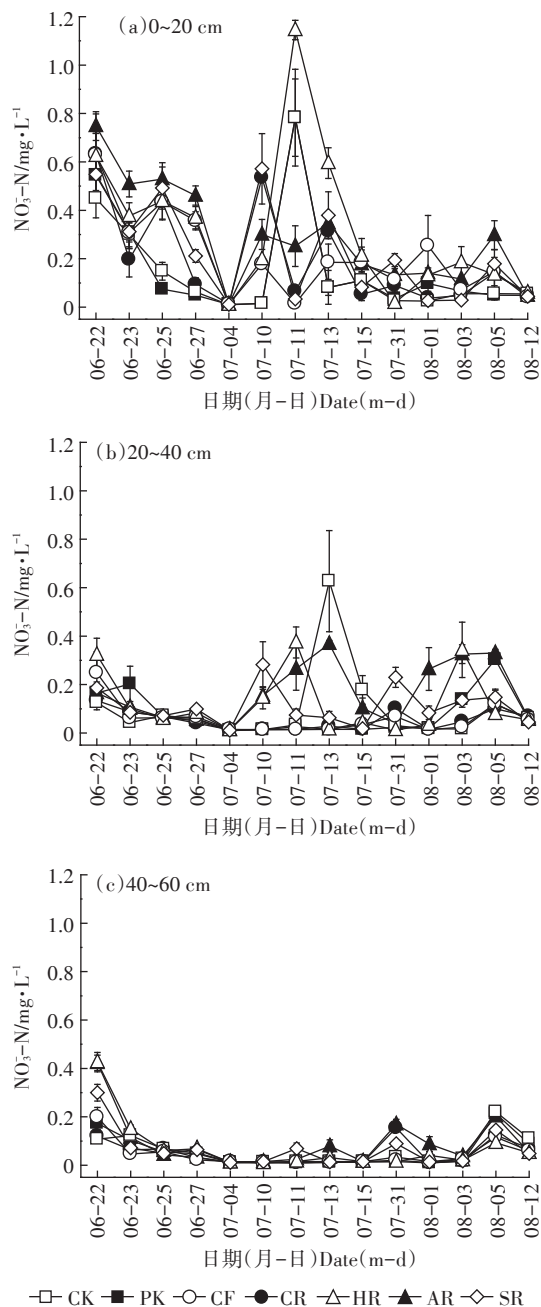


图4 稻田0~20、20~40、40~60 cm深度土壤渗漏水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的动态变化

Figure 4 Dynamic change of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in soil seepage at 0~20, 20~40 and 40~60 cm depths in paddy water

淋失率大小顺序依次为 $\text{AR} > \text{CF} > \text{CR} > \text{HR} > \text{SR}$ 。除AR处理外,增效复合肥HR与SR处理的氮素淋失率明显低于常规肥CF和CR处理,其中以SR处理表现突出,较CF和CR处理TN淋失率分别降低了0.460个百分点和0.310个百分点,降幅分别达24.7%和18.1%。不同施肥处理的氮素渗漏损失量也表现出明显差异,添加增效载体的3种新型复合肥氮素减施处理较常

规施肥CF处理均明显降低氮素渗漏损失量,以SR氮肥减施处理最为明显,渗漏损失量为 $7.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是HR和AR,但3种增效复合肥处理间的氮素渗漏损失量差异不显著。

3 讨论

稻田氮素损失量与稻田水氮素浓度有关。本研究表明,施氮量与肥料种类对稻田田面水氮素浓度影响明显。施基肥2~3 d,各施肥处理田面水TN与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度均达到峰值,其中CR处理田面水TN与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度较CF处理的峰值分别降低了16.5%、33.7%,表明稻田减氮施肥明显降低田面水氮素浓度,这与前人研究结果类似^[20]。3种添加增效载体的新型复合肥对稻田田面水TN与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度峰值影响明显,在减氮施用条件下,SR处理的田面水TN与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度峰值最低,较同样减氮的常规复合肥CR处理分别降低了38.4%、14.3%,表明添加海藻酸的新型增效复合肥较常规肥能明显降低施肥后田面水中TN与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度峰值,这可能和海藻酸通过与尿素结合形成稳定的结构或抑制了土壤脲酶的活性,增加了复合肥料中尿素态氮的缓释性有关^[21-22]。各处理TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度动态变化趋势相似,在每次施肥后的第2~3 d内达到峰值,随着植株的吸收、土壤的吸附、氨挥发、 N_2O 排放等,一周后田面水氮素浓度逐渐下降并趋于稳定,施肥一周内是控制田面水氮素流失的关键时间节点,这与前人^[23-26]研究报道一致。田面水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在整个水稻生育期内较低,均小于 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能与稻田长期控制淹水深度有关,硝化作用较弱, $\text{NH}_4\text{-N}$ 是稻田氮素存在的主要形态^[20, 23]。本研究中,不同深度稻田渗漏水氮素形态以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,这与李娟等^[23]得出的稻田渗漏水以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主的研究结果有所不同,主要原因可能与监测期间稻田长期控制淹水深度有关,一方面抑制了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的硝化过程,另一方面又增强了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 向下迁移的能力。另外,不同地区土壤类型、施肥种类和用量、作物生长环境、气候类型、灌溉方式等也导致了氮素不同形态浓度的差异^[27],目前在稻季渗漏水中氮素主要存在形态方面尚无统一的结论。

稻田氮素损失与稻季径流、渗漏损失关系密切。其中径流损失受诸多试验条件和径流测定方法的影响,不同试验条件结果差异较大,有报道表明,稻田氮素损失变幅在 $0.5 \sim 54.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间^[28-29]。本研究运用SCS-CN模型计算稻田降雨径流量,影响模型计算

表2 不同施肥处理氮素损失量
Table 2 Nitrogen loss under different fertilization treatments

处理 Treatments	氮素损失量 Nitrogen loss/kg·hm ⁻²			TN 流失率 TN loss rate/%	TN 淋失率 TN leaching rate/%
	总损失量	径流损失量	渗漏损失量		
CK	7.14±0.32d	3.17±0.14d	3.97±0.28c	—	—
PK	8.75±0.49d	3.73±0.44d	5.02±0.26c	—	—
CF	20.81±0.48a	11.33±0.58a	9.48±0.24a	3.17	1.86
CR	18.04±0.63b	9.74±0.66b	8.30±0.07ab	3.13	1.71
HR	17.40±0.70b	9.41±0.09b	7.99±0.62b	2.96	1.55
AR	17.12±1.08b	8.37±0.73b	8.75±0.55ab	2.42	1.94
SR	13.92±0.63c	6.22±0.44c	7.70±0.40b	1.30	1.40

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

结果的关键参数是CN值, Im等^[15]和Jung等^[16]运用SCS-CN模型时发现, 稻作条件下CN值的确定取决于稻田淹水深度。基于Im等^[15]的研究结果, 试验小区的淹水深度控制在50 mm左右, 综合考虑本试验区的其他因素, 确定模型关键参数CN值为82用于计算径流量。模型结果表明, 施氮肥处理的氮素径流损失量均处在相关研究结果的数值变幅范围内, 一定意义上说明此模型可以用于该区域降水径流量的计算, 模型精度的提高还需要进一步试验验证和模型参数修正。

此外, 农田氮素渗漏损失作为氮素损失的重要组成部分, 对农业面源污染的影响不容忽视。稻季不同施肥处理(P、K除外)TN淋失率为1.40%~1.94%, 略低于Qiao等^[30]研究报道的1.86%~4.96%, 而胡玉婷等^[31]的研究认为水田中TN表观淋失率平均为2.19%, 这可能与气候条件、土壤质地、作物类型、耕作方式、施肥管理措施等不同有关, 导致不同试验的氮素渗漏损失量有所差异^[31-32]。

从不同处理稻田水氮素损失总量看, 增效复合肥减氮处理明显降低了稻田水氮素损失。和常规复合肥CR处理相比, SR处理显著降低了稻田水氮素损失量($P<0.05$), 试验条件下, 海藻酸增效复合肥减氮明显, 降低了化肥氮素损失风险, 有效降低了农业面源污染压力。究其原因, 首先与海藻酸增加了尿素态氮的稳定性和缓释性有关^[21-22]; 其次是海藻酸本身含有的多聚糖、多酚、甘露醇等生物活性成分和植物生长调节物质(生长素、赤霉素、脱落酸、细胞分裂素等)能刺激作物生长, 提高作物对肥料养分的吸收和利用能力^[33], 同时还能够改善土壤的物理、化学和生物学性质^[10, 34-35], 增加土壤对化肥氮素的保蓄能力。

4 结论

- (1) 增效复合肥减氮施用能有效降低田面水和渗漏水中氮素浓度, 减少氮素流失的风险。减氮施用条件下, 海藻酸增效复合肥降低了田面水TN和NH₄⁺浓度峰值。渗漏水中TN浓度峰值同样以海藻酸复合肥降低最为明显。渗漏液中氮素形态以NH₄⁺-N为主。
- (2) 稻田水TN和NH₄⁺-N浓度动态变化趋势相似, 施肥7 d内, 田面水氮素浓度较高, 随后逐渐下降, 至一周后降至峰值的15%以下并趋于稳定, 施肥后一周是控制氮素径流损失的关键时期。
- (3) 减氮施肥降低了稻田水氮素的径流和渗漏损失, 以海藻酸复合肥减氮效果最显著。减氮条件下, 海藻酸复合肥较常规复合肥减氮处理稻田水氮素损失总量降低了22.8%, 氮素流失率降低了58.5%, 氮素淋失率降低了18.1%。增效复合肥尤其是海藻酸增效复混肥减氮施用是控制稻田氮素损失的重要技术途径, 其控制稻田氮素损失的过程和作用机制还需要进一步深入研究。

参考文献:

[1] 麻 坤, 刁 钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1113-1120.
MA Kun, DIAO Gang. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1113-1120.
[2] 武 良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 76-83.
WU Liang, ZHANG Wei-feng, CHEN Xin-ping, et al. Nitrogen fertilizer input and nitrogen use efficiency in Chinese farmland[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016(4): 76-83.
[3] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技

- 术体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 729-736.
- XUE Li-hong, LI Gang-hua, HOU Peng-fu, et al. Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 729-736.
- [4] 冯 轲, 田晓燕, 王莉霞, 等. 化肥配施生物炭对稻田田面水氮磷流失风险影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 329-335.
- FENG Ke, TIAN Xiao-yan, WANG Li-xia, et al. Influence of combined synthetic fertilizer and biochar applications on nitrogen and phosphorus losses from surface water of paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 329-335.
- [5] 华玲玲, 王洪媛, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对稻油轮作农田磷流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1376-1383.
- HUA Ling-ling, WANG Hong-yuan, ZHAI Li-mei, et al. Effects of maize stover biochar on phosphorus losses in rice-oilseed rape cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1376-1383.
- [6] 田 昌, 周 旋, 刘 强, 等. 控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3267-3274.
- TIAN Chang, ZHOU Xuan, LIU Qiang, et al. Effects of the reduction of controlled-release urea application on nitrogen leaching in double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3267-3274.
- [7] 谢 荔, 成学慧, 冯新新, 等. 氨基酸肥料对‘夏黑’葡萄叶片光合特性与果实品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(2): 31-37.
- XIE Li, CHENG Xue-hui, FENG Xin-xin, et al. Effects of an amino acid fertilizer on the leaf photosynthesis and fruit quality of ‘Summer Black’ grape[J]. *Journal of Nanjing Agriculture University*, 2013, 36(2): 31-37.
- [8] 曾宪成, 李 双. 让腐植酸在补充和提升土壤肥力中发挥重要作用: 开展“土壤腐植酸肥力综合指数”研究刻不容缓[J]. 腐植酸, 2014(2): 1-8.
- ZENG Xian-cheng, LI Shuang. Making humic acid playing an important role on complementing and improving soil fertility: Urgent need of developing "soil humic acid fertility comprehensive index"[J]. *Soil Humic Acid*, 2014(2): 1-8.
- [9] 李 军, 袁 亮, 赵秉强, 等. 腐植酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 524-530.
- LI Jun, YUAN Liang, ZHAO Bing-qiang, et al. Effect of urea containing humic acid on maize growth and ^{15}N utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 524-530.
- [10] 谭习羽, 程 雄, 黄淑芬, 等. 海藻肥在水稻上最新应用进展[J]. 农学学报, 2018, 8(10): 23-27.
- TANG Xi-yu, CHENG Xiong, HUANG Shu-fen, et al. Application of seaweed fertilizer in rice recent advances[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(10): 23-27.
- [11] 姚单君, 张爱华, 杨 爽, 等. 新型氮肥对水稻产量养分积累及吸收利用的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(10): 2121-2126.
- YAO Dan-jun, ZHANG Ai-hua, YANG Shuang, et al. Effects of new-type fertilizer application on yield, nutrient accumulation and fertilizer utilization of rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(10): 2121-2126.
- [12] 袁 亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620-628.
- YUAN Liang, ZHAO Bing-qiang, LIN Zhi-an, et al. Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 620-628.
- [13] 张水勤, 袁 亮, 李 伟, 等. 腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1207-1214.
- ZHANG Shui-qin, YUAN Liang, LI Wei, et al. Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1207-1214.
- [14] Mishra S K, Jain M K, Pandey R P, et al. Catchment area-based evaluation of the AMC-dependent SCS-CN-based rainfall-runoff models [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(14): 2701-2718.
- [15] Im S, Park S, Jang T. Application of SCS curve number method for irrigated paddy field[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2007, 11(1): 51-56.
- [16] Jung J W, Yoon K S, Choi D H, et al. Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields equipped with surface drainage pipes[J]. *Agricultural Water Management*, 2012(110): 78-83.
- [17] 汤 英, 董金龙, 王媛华, 等. 一次性施用草酰胺对水稻产量、氮肥利用率、氮挥发和氮素渗漏损失的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 50-55, 74.
- TANG Ying, DONG Jin-long, WANG Ai-hua, et al. Effects of single application of oxalamide on rice yield, nitrogen utilization rate, ammonia volatilization and nitrogen leakage loss[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019, 47(5): 50-55, 74.
- [18] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156(4): 1-11.
- [19] 黄沈发, 陆贻通, 沈根祥, 等. 上海郊区旱作农田氮素流失研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 50-53.
- HUANG Shen-fa, LU Yi-tong, SHEN Gen-xiang, et al. Nitrogen losses from dry farming fields in Shanghai suburbs[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2): 50-53.
- [20] 王 强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 168-175.
- WANG Qiang, JIANG Li-na, PANG Jian-qing, et al. Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 168-175.
- [21] 黄建林, 王德汉, 刘承昊, 等. 载体尿素的研制及其释放机理研究初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 451-453.
- HUANG Jian-lin, WANG De-han, LIU Cheng-hao, et al. Study on the development of slow release carrier urea and its release mechanism[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(3): 451-453.
- [22] 殷军港. 海藻肥料的发展与海藻尿素[C]//北京: 第二届全国新型肥料学术研讨会论文集, 2010: 232-237.

- YIN Jun-gang. Development of algae fertilizer and alginic urea[C]// Beijing: Proceedings of China second symposium of new fertilizer, 2010:232-237.
- [23] 李娟, 李松昊, 邬奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5):23-28, 33.
- LI Juan, LI Song-hao, WU Qi-feng, et al. Effects of different fertilizer treatments on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5):23-28, 33.
- [24] 李冬初, 徐明岗, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):303-310.
- LI Dong-chu, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Dynamics of nitrogen in double-rice paddy soil under application of chemical fertilizer combined with manure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(2):303-310.
- [25] 张志剑, 董亮, 朱荫湄. 水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4):475-480.
- ZHANG Zhi-jian, DONG Liang, ZHU Yin-mei. The dynamic characteristics and modeling of nitrogen in paddy field surface water and nitrogen loss from field drainage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4):475-480.
- [26] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):39-43, 48.
- ZHENG Xiao-long, WU Jia-sen, CHEN Pei-pei, et al. Effects of reducing nitrogen and biomass carbon fertilization on loss of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field and grain production[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):39-43, 48.
- [27] 陈贵, 陈莹, 施卫明. 氮肥对水稻不同生长期土壤不同深度氮素渗漏的影响[J]. 土壤, 2013, 45(5):809-814.
- CHEN Gui, CHEN Ying, SHI Wei-ming. Effect of fertilizer N on N leaching at different soil depths during growth periods of rice[J]. *Soils*, 2013, 45(5):809-814.
- [28] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):6-10.
- ZHU Li-qun, XIA Xiao-jiang, HU Qing-yu, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):6-10.
- [29] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):105-112, 118.
- YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):105-112, 118.
- [30] Qiao J, Yang L, Yan T, et al. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49(4):93-103.
- [31] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, 43(1):19-25.
- HU Yu-ting, LIAO Qian-jiahua, WANG Shu-wei, et al. Statistical analysis and estimation of N leaching from agricultural fields in China[J]. *Soils*, 2011, 43(1):19-25.
- [32] 尹海峰, 焦加国, 孙震, 等. 不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J]. 土壤, 2013, 45(2):1199-1206.
- YIN Hai-feng, JIAO Jia-guo, SUN Zhen, et al. Nitrogen leaching losses from paddy fields under different water and fertilizer managements in Taihu Lake area[J]. *Soils*, 2013, 45(2):1199-1206.
- [33] 黄继川, 彭智平, 涂玉婷, 等. 施用海藻酸复合肥料的双季稻产量和氮磷肥料效应[J/OL]. 热带作物学报: 1-15[2019-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1019.S.20191216.1147.028.html>.
- HUANG Ji-chuan, PENG Zhi-ping, TU Yu-ting, et al. Yield, nitrogen and phosphorus fertilizer effects of alginate compound fertilizer on double-cropping rice[J/OL]. *Chinese Journal of Tropical Crops*: 1-15[2019-12-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1019.S.20191216.1147.028.html>.
- [34] Blunden G, Morse P F, Mathe I, et al. Betaine yields from marine algal species utilized in the preparation of seaweed extracts used in agriculture[J]. *Nat Prod Commun*, 2010, 5(4):581-585.
- [35] 刘超, 相立, 王森, 等. 土壤熏蒸剂棉隆加海藻菌肥对苹果连作土微生物及平邑甜茶生长的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(10):1995-2003.
- LIU Chao, XIANG Li, WANG Sen, et al. Effects of dazomet fumigation and seaweed biologic fertilizer on the malus hupehensis seedlings and soil microbial quantity under replant conditions[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(10):1995-2003.