中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和Cu、Pb变化的影响

宋蝶，何忠虎，董永华，戴巍，杨晓磊，曹林奎，沙之敏

引用本文:
宋蝶, 何忠虎, 董永华, 等. 沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和Cu、Pb变化的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 608–618.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190825

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施用河道污泥对水稻和土壤重金属含量及水稻氮素利用的影响

Effects of dredged sludge application on heavy metal content and nitrogen use efficiency in rice–soil system

中国生态农业学报. 2016(2): 163–172 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151020

水稻分蘖期沼液施灌对农田水体氮素的影响

Effects of biogas slurry application on paddy field water nitrogen content at tillering stage

中国生态农业学报. 2015(12): 1544–1551 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150687

紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对Cu、Pb复合污染土壤修复能力的研究

Phytoremediation of single and combined pollution of Cu and Pb by Medicago sativa, Lolium perenne, and Pennisetum alopecuroides

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 303–313 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170363

秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响

Spring maize yield and soil potassium balance under replacement of potassium with straw in karst peak–cluster depression

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1823–1831 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170800

磁化处理促进施氮条件下葡萄氮素的代谢和分布

Effect of applying nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and distribution in grapevine under magnetic treatment of water

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 535–544 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190648

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 4 月 第 28 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2020, 28(4): 608−618

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190825

宋蝶, 何忠虎, 董永华, 戴巍, 杨晓磊, 曹林奎, 沙之敏. 沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和 Cu、Pb 变化的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 608−618

SONG D, HE Z H, DONG Y H, DAI W, YANG X L, CAO L K, SHA Z M. Nitrogen losses and Cu, Pb changes of paddy field affected by adding duckweed under biogas slurry application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 608−618

沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和 Cu、Pb 变化的影响*

宋 蝶[1], 何忠虎[2], 董永华[3], 戴 巍[1], 杨晓磊[4], 曹林奎[1], 沙之敏[1**]

(1. 上海交通大学农业与生物学院 上海 200240; 2. 上海新农饲料股份有限公司 上海 201600; 3. 上海市农产品质量安全中心 上海 201799; 4. 上海市农业技术推广服务中心 上海 201103)

摘 要: 养分流失和重金属积累是沼液还田资源化利用过程中的主要问题。为探讨利用浮萍吸收氮磷、富集重金属的能力调控沼液施用中环境污染问题的可行性, 在上海市金山区开展了水稻田间试验, 研究沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和 Cu、Pb 的影响。试验设置 4 个处理: 常规化肥、常规化肥+浮萍、沼液全量替代化肥和沼液全量替代化肥+浮萍, 测定并比较了不同处理下稻田田面水氮素浓度变化、径流水氮素流失负荷, 土壤、水稻籽粒及秸秆中 Cu 和 Pb 含量差异。结果表明: 不同处理田面水总氮、铵态氮(NH_4^+-N)浓度变化趋势基本一致, 均在每次施肥后第 1 d 达到峰值, 此后逐日递减, 在施肥后第 5 d 降至峰值的 30%以下; 硝态氮(NO_3^--N)浓度峰值滞后 3~7 d。稻田中添加浮萍能够显著降低田面水 TN 含量, 沼液全量替代化肥+浮萍处理的 TN 总径流流失负荷为 3.67 kg·hm^{-2}, 比常规化肥处理显著降低 37.2%。沼液全量替代化肥+浮萍处理土壤 Cu 和 Pb 含量为 22.65 mg·kg^{-1} 和 49.05 mg·kg^{-1}, 与其他处理间无显著差异; 但土壤有效态 Cu 和 Pb 含量较常规化肥处理显著提高 18.6%和 17.5%。不同处理水稻秸秆 Cu 和 Pb、籽粒 Pb 含量无显著差异, 但沼液全量替代化肥+浮萍处理水稻籽粒 Cu 含量较沼液全量替代化肥处理显著减少 41.1%。综上, 沼液施用条件下添加浮萍可以降低稻田氮素流失, 在控制土壤、籽粒和秸秆中重金属 Cu 和 Pb 含量增加方面具有一定效果, 在短期内可以作为沼液还田模式下水体和土壤污染有效的调控手段。

关键词: 稻田; 沼液; 浮萍; 氮素流失; 流失负荷; 重金属

中图分类号: S157.1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Nitrogen losses and Cu, Pb changes of paddy field affected by adding duckweed under biogas slurry application*

SONG Die[1], HE Zhonghu[2], DONG Yonghua[3], DAI Wei[1], YANG Xiaolei[4], CAO Linkui[1], SHA Zhimin[1**]

(1. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai New Type Feed Co., Ltd, Shanghai 201600, China; 3. Shanghai Agricultural Product Quality and Safety Center, Shanghai 201799, China; 4. Shanghai Agricultural Technology Extension Service Center, Shanghai 201103, China)

Abstract: Nutrient loss and heavy metal accumulation are major problems in the utilization of biogas slurry as a resource. Duckweed,

* 国家重点研发计划课题(2016YFD08011106)、上海市科技兴农推广项目[沪农科推字(2018)第 4-7 号, 沪农科推字(2019)第 2-1 号]资助

** 通信作者: 沙之敏, 主要研究方向为植物营养学与农业面源污染控制。E-mail: zhiminsha@sjtu.edu.cn
宋蝶, 主要研究方向为农业生态学。E-mail: lmtsd681@163.com

收稿日期: 2019-11-22 接受日期: 2020-02-11

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD08011106), the Shanghai Science and Technology Promotion Project [(2018) No. 4-7, (2019) No. 2-1].

** Corresponding author, E-mail: zhiminsha@sjtu.edu.cn

Received Nov. 22, 2019; accepted Feb. 11, 2020

which can absorb nitrogen and phosphorus and take up heavy metals, can be used to control environmental pollution in biogas slurry irrigation. To study the effects of duckweed on nitrogen loss and reduction in Cu and Pb heavy metals in a paddy field fertilized with biogas slurry, a field experiment was conducted in Jinshan District, Shanghai, China. The experiment comprised four treatments: (1) chemical fertilization (CF); (2) chemical fertilization + duckweed (CF + D); (3) biogas slurry (BS); (4) biogas slurry + duckweed (BS + D). The changes in nitrogen concentration in paddy field surface water, nitrogen-loss load in runoff water, and the levels of Cu and Pb in soil, rice grain and straw under different treatments were measured and compared. The results showed that the trends in the variation of total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N) concentrations in the surface water of different treatments were the same. The concentrations reached peak values on the first day after each fertilization, and then decreased day by day. On the fifth day after fertilization, they dropped below 30% of the peak. The peak value of nitrate nitrogen (NO_3^--N) concentration lagged by 3–7 days. The addition of duckweed when biogas slurry application significantly reduced TN content in surface water, and the total TN loss load of BS+D treatment was 3.67 kg·hm^{-2}. Compared with the CF treatment, the TN loss load with BS+D treatment was lower by 37.2%. The Cu and Pb contents of the soil treated with BS+D was 22.65 mg·kg^{-1} and 49.05 mg·kg^{-1}, which was not significantly different to levels in the other treatments, but the available Cu and Pb levels in the soil treated with BS+D treatment were significantly higher than those treated with CF, by 18.6% and 17.5%, respectively. There was no significant difference in the contents of Cu and Pb in rice straw and grain, but the grain content of Cu in BS+D treatment decreased by 41.1% compared with BS treatment. In summary, adding duckweed to field applied with biogas slurry can reduce nitrogen loss in paddy fields, and can control the increase of Cu and Pb in soil and rice grain and straw to a certain extent. It can be an effective means to control water and soil pollution under biogas slurry irrigation mode.

Keywords: Paddy field; Biogas slurry; Duckweed; Nitrogen loss; Loss load; Heavy metals

水稻(*Oryza sativa*)是我国主要粮食作物之一，播种面积大，化肥施用量高，稻田中氮磷流失是农业面源污染和河、湖水质富营养化的重要来源之一[1]。沼液是厌氧发酵产生沼气后的副产物，速效养分含量高，能够直接被作物吸收利用[2]。研究表明，沼液农用能显著地改良土壤[3]、确保农作物生长所需的养分[4]，提高作物产量和品质[5-6]，具有较高的应用价值。然而沼液施入土壤中在遇强降雨后随水流失也会对环境造成严重的影响[7]。姜丽娜等[8]研究表明，连续施用沼液对地下水环境没有显著影响，但田面水铵态氮(NH_4^+-N)含量明显高于全化肥处理，在施后 3 d 内有增加径流氮损失的环境风险。此外，饲料添加剂(含 Zn、Cu、As 制剂等)在畜禽养殖中的使用也会导致重金属在环境中的富集。近年来针对施用沼液对生态系统中重金属迁移转化影响的研究也越来越多[9-10]。王玮等[11]研究表明沼液还田处理后表层土壤 Cu、Zn、Pb、Cd、As 等重金属出现一定程度的积累。在合理范围内施用沼液时，会增加农作物各类营养成分含量，但沼液灌溉量过高时可能会增加重金属在作物中的累积风险[11]。上海地区水稻种植面积在 10.67 万 hm^2，其中金山区 1.93 万 hm^2，占全市水稻种植面积的 18%[12]。上海地区 2010 年化肥施用量为 522 kg·hm^{-2}，明显高于全国平均水平 346 kg·hm^{-2}[13]，且上海地区化肥利用率仅为 35%，远低于发达国家的 50%~60%[14]。2014 年公布的全国土壤污染状况调查结果显示，Cu 和 Pb 均为主要的超标重金属，其点位超标率分别为 2.1%和 1.5%[15]。土壤中适量的 Cu 对作物生长发育起促进作用，但 Cu 超过一定浓度会导致土壤环境质量下降，干扰土壤生物体的生命代谢，并威胁农产品质量安全[16-17]。赵江宁等[18]5 年观测试验结果表明，土壤 Cu 污染抑制水稻分蘖和生长，并使水稻减产。有研究表明，我国农田土壤 Pb 含量明显高于土壤背景值[19]。城市郊区蔬菜、粮食、水果、肉类与畜产品中的 Pb 超标率分别为 38.6%、28.0%、27.6%、41.9%和 71.1%，Pb 是最严重的污染元素之一[20]。

浮萍(*Lemna minor*)为浮萍科(Lemnaceae)水生维管束植物，生于沼池、湖泊或静水中，具有繁殖快、产量高、个体小、易从污染水体中快速富集重金属等优点[21]。浮萍科植物对污水中的氨、重金属等均具有较高的耐受性[22-25]，能在多种富含营养的污水中生长，在污水中相对生长速率可达 0.10~0.35 g(DW)·g(DW)$^{-1}$·d^{-1}[26]。近年来，我国已在相关领域开展了大量的基础和应用研究，如 pH[22]和温度[27]等环境因子对浮萍生长影响等基础研究，以及浮萍污水净化系统的除氮途径[28]、富集重金属的浮萍品种筛选[29]、浮萍对猪场废水中氮磷去除[30]、沼液浓度对浮萍生长的影响[31]等应用研究。沈根祥[32]早于 2005 年在利用浮萍净化氮磷污水方面研究取得相关进展。于斌[33]研究表明，浮萍投放密度为 60%~100%时对氮磷的去除率较高。

目前浮萍相关研究大多数为室内模拟试验，缺乏大田试验验证，而养分流失和重金属积累是沼液还田资源化利用过程中的主要问题，浮萍具有吸收

氮磷、富集重金属的优点，在沼液还田中环境污染问题的调控具有较大的潜力。但针对沼液施用下添加浮萍对稻田氮素流失的减少效果和对土壤重金属 Cu 和 Pb 含量影响程度的研究目前尚不清楚。因此，本研究拟通过大田试验，研究在上海郊区沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和土壤重金属 Cu 和 Pb 含量的影响，以期为沼液的稻田安全利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在上海市金山区某规模化猪场附近稻田中(30°54′N，121°9′E)开展，该地区位于上海市西南远郊，属北亚热带季风地区，雨量充沛，年平均降雨量 1 156.7 mm。试验田长期种植水稻，土壤质地为黏壤土，试验前土壤基本理化性质为：全氮 1.82 g·kg^{-1}、全磷 0.68 g·kg^{-1}、全钾 2.35 g·kg^{-1}、有效磷 17.69 mg·kg^{-1}、速效钾 123.96 mg·kg^{-1}、有机质 39.49 g·kg^{-1}、pH 7.60、全 Cu 26.42 mg·kg^{-1}、全 Pb 55.64 mg·kg^{-1}。

1.2 试验材料与设计

供试水稻品种为‘秋优金丰’。供试沼液来源于猪场沼气工程，沼液平均含全氮 1 184 mg·L^{-1}、全磷 56.7 mg·L^{-1}、全钾 428 mg·L^{-1}、NH_4^+-N 888 mg·L^{-1}、硝态氮(NO_3^--N)53 mg·L^{-1}、可溶性磷 16.45 mg·L^{-1}、Cu 0.83 mg·kg^{-1} 和 Pb 0.003 mg·kg^{-1}，pH 为 8.33。供试浮萍主要为‘青萍’和‘少根紫萍’，浮萍(干重)全氮含量平均为 28.50 g·kg^{-1}、全磷 4.98 g·kg^{-1}、全钾 4.08 g·kg^{-1}、全 Cu 12.50 mg·kg^{-1}、全 Pb 5.18 mg·kg^{-1}。

试验设置 4 个处理：1)常规化肥处理(CF)，施用以尿素、过磷酸钙、硫酸钾为肥源的氮、磷、钾肥，用量按上海地区推荐施肥设置，分别为 300 kg(N)·hm^{-2}、75 kg(P_2O_5)·hm^{-2}、120 kg(K_2O)·hm^{-2}；2)常规化肥+浮萍处理(CF+D)；3)沼液全量替代化肥处理(BS)；4)沼液全量替代化肥+浮萍处理(BS+D)。不同处理具体施肥量见表 1，每处理施氮量均为 300 kg(N)·hm^{-2}。试验设 3 次重复，随机区组排列，小区面积为 400 m^2。水稻于 6 月 23 日插秧，11 月 9 日收获。试验中沼液按常规水稻氮肥施用时期分 3 次施入，比例为 2∶1∶1。根据前人研究结果，浮萍投放初始密度设置为 80%[33]，在稻田灌水插秧时投入，其他田间管理措施按当地常规进行。

1.3 采样及测定方法

每试验小区安装一套径流装置，径流管直径 110 mm，田间采用直径 300 mm 的滤水桶装置，桶周边开孔，桶内为过滤用碎石，溢流口高度可根据水位随机调节，出水口设集水桶，用以采集径流水，如图 1 所示。径流水在强降雨产生径流时采集。田面水在每次施肥后的 1 d、3 d、5 d、7 d、10 d 采集。水稻种植前和收获后用 5 点取样法采集 0~20 cm 混合土壤样品，放置于阴凉通风处风干，经研磨过筛后待测。水稻收获期，采取各小区代表性的水稻植株样本，分为籽粒和秸秆两部分，烘干称量后粉碎备用。田面水样总氮(TN)、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分别采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度法、纳氏分光光度法和紫外分光光度法测定；植株重金属 Cu 和 Pb 经 HNO_3-$HClO_4$ 消解后经 ICP 上机测定，土壤有效铜和有效铅经 DTPA-2Na 浸提后经 ICP 上机测定[34]。

1.4 数据处理与计算方法

氮素流失负荷(kg·hm^{-2})=径流水氮素浓度(mg·L^{-1})×径流量(L·m^{-2}) (1)

径流量(L·m^{-2})=0.899×降雨量(mm)−14.017[35] (2)

试验数据采用 Excel 2016、SPSS 22、Origin 2017 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 沼液施用条件下添加浮萍对稻田田面水氮素浓度动态变化的影响

从图 2 可知，不同处理田面水 TN 浓度均在每次施肥后 1 d 达到峰值，此后逐日递减。CF、CF+D、BS、BS+D 处理田面水 TN 浓度在第 1 次施肥后 1 d 分别达到峰值 45.09 mg·L^{-1}、31.05 mg·L^{-1}、45.92 mg·L^{-1}、

表 1 不同处理的施肥量

Table 1 Fertilizers application rates of different treatments

处理 Treatment		沼液 Biogas slurry [kg(N)·hm^{-2}]	尿素 Urea (kg·hm^{-2})	过磷酸钙 Calcium superphosphate (kg·hm^{-2})	硫酸钾 Potassium sulfate (kg·hm^{-2})	浮萍投入量 Duckweed [kg(FW)·hm^{-2}]
CF	常规化肥 Chemical fertilizer	0	652	122	240	0
CF+D	常规化肥+浮萍 Chemical fertilizer + duckweed	0	652	122	240	2 000
BS	沼液全量代替化肥 Biogas slurry	300	0	0	0	0
BS+D	沼液全量代替化肥+浮萍 Biogas slurry + duckweed	300	0	0	0	2 000

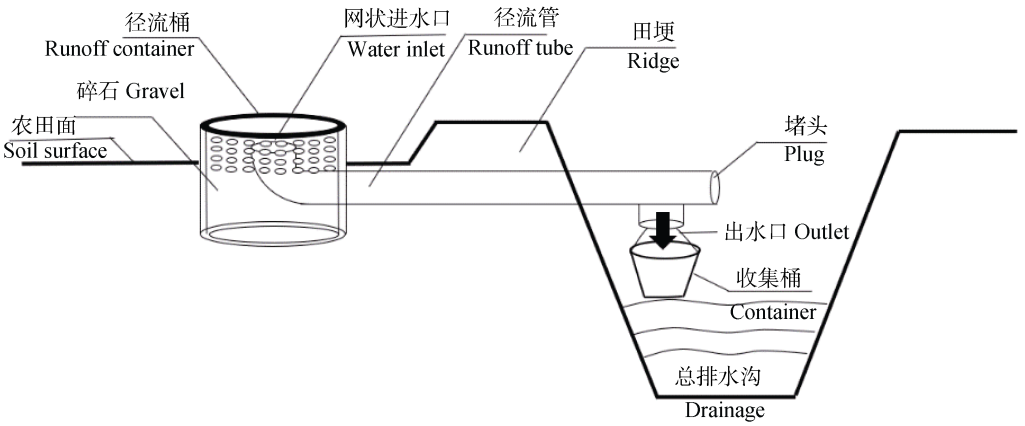

图 1　径流装置示意图
Fig. 1　Schematic diagram of runoff device

33.55 mg·L^{-1}, 第 2 次施肥后 1 d 分别达到峰值 23.76 mg·L^{-1}、24.03 mg·L^{-1}、20.50 mg·L^{-1}、31.94 mg·L^{-1}, 第 3 次施肥后 1 d 分别达到峰值 29.45 mg·L^{-1}、27.26 mg·L^{-1}、20.98 mg·L^{-1}、8.90 mg·L^{-1}。田面水 TN 浓度在施肥后 5 d 降至峰值的 30%以下, 7 d 降至峰值的 20%以下, 10 d 降至峰值的 10%以下, 并趋于稳定。整个水稻生长季 CF、CF+D、BS、BS+D 处理田面水 TN 平均浓度分别为 13.14 mg·L^{-1}、12.10 mg·L^{-1}、12.40 mg·L^{-1}、10.40 mg·L^{-1} (15 次), BS+D 处理最低, 氮流失风险最低。

田面水 NH_4^+-N 浓度变化趋势与 TN 浓度基本保持一致。CF、CF+D、BS、BS+D 处理田面水 NH_4^+-N 浓度在第 1 次施肥后 1 d 分别达到峰值 26.60 mg·L^{-1}、21.83 mg·L^{-1}、28.77 mg·L^{-1}、19.10 mg·L^{-1}, 第 2 次施肥后 1 d 分别达到峰值 17.75 mg·L^{-1}、17.18 mg·L^{-1}、22.85 mg·L^{-1}、26.50 mg·L^{-1}, 第 3 次施肥后 1 d 分别达到峰值 20.81 mg·L^{-1}、18.11 mg·L^{-1}、15.26 mg·L^{-1}、6.80 mg·L^{-1}。田面水 NH_4^+-N 浓度在施肥后 5 d 降至峰值的 30%以下, 7 d 降至峰值的 20%以下, 10 d 降至峰值的 10%以下, 并趋于稳定。

田面水 NO_3^--N 浓度和峰值均低于 NH_4^+-N , CF 在第 1 次施肥后 7 d 达到峰值 2.18 mg·L^{-1}, CF+D、BS、BS+D 处理在第 1 次施肥后 5 d 分别达到峰值 2.97 mg·L^{-1}、2.43 mg·L^{-1}、2.32 mg·L^{-1}。

2.2　沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素径流流失的影响

2018 年水稻季发生强降雨并产生径流共 6 次, 不同处理径流总氮流失量为 0.14~2.21 kg·hm^{-2}(图 3); 不同日期 TN 流失负荷存在较大差异。7 月 4 日, CF 处理 TN 径流流失负荷高达 1.95 kg·hm^{-2}, 显著高于其他 3 种处理, 且该天的径流量为 13.4 L·m^{-2}; 7 月 6 日各处理平均 TN 径流流失负荷为 0.19 kg·hm^{-2}, 仅占 TN 总径流流失负荷(4.74 kg·hm^{-2})的 4.01%, 因为该天是第 1 次施肥后的 13 d, 此时田面水中 TN 浓度较低, 且产生的径流量也较低。尽管 8 月 21 日已是第 3 次施肥后的 11 d, 但试验区遇台风强降水, 产生径流量平均高达 70.6 L·m^{-2}, CF、CF+D、BS 和 BS+D 处理的 TN 径流流失负荷均较高, 分别为 1.12 kg·hm^{-2}、1.71 kg·hm^{-2}、1.61 kg·hm^{-2} 和 1.33 kg·hm^{-2}, 占对应处理生育期 TN 总径流流失负荷(5.84 kg·hm^{-2}、4.17 kg·hm^{-2}、5.27 kg·hm^{-2}、3.67 kg·hm^{-2})的 20.7%、40.9%、33.3%和 36.2%。因此, 径流水中 TN 浓度和降雨量是氮素流失的主要影响因素。

水稻整个生育期 CF、CF+D、BS 和 BS+D 处理的 TN 总径流流失负荷分别为 5.84 kg·hm^{-2}、4.17 kg·hm^{-2}、5.27 kg·hm^{-2} 和 3.67 kg·hm^{-2}(表 2)。其中, CF 处理 TN 总流失负荷显著高于 CF+D 和 BS+D 处理, 与 CF 处理相比, CF+D、BS+D 处理 TN 总流失负荷分别降低 28.6%、37.2%, 但 CF 与 BS 处理差异不显著。而与 BS 处理相比, BS+D 处理 TN 总流失负荷显著降低 30.4%。不同处理不同形态氮素流失比例较为接近, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失负荷分别占 TN 流失负荷的 17.2%~27.4%和 34.8%~46.9%, 氮素径流流失以无机氮为主, 且 NO_3^--N 比重要高于 NH_4^+-N 。不同处理间 NH_4^+-N 流失负荷差异不显著, 但 CF 处理 NO_3^--N 流失负荷较 BS+D 处理显著提高 47.9%, 沼液中添加浮萍有效降低了 NO_3^--N 流失负荷。CF、CF+D、BS 和 BS+D 处理的径流流失总氮占施氮比分别为 1.9%、1.4%、1.8%和 1.2%, 其大小与 TN 流失负荷的大小表现出一致性。

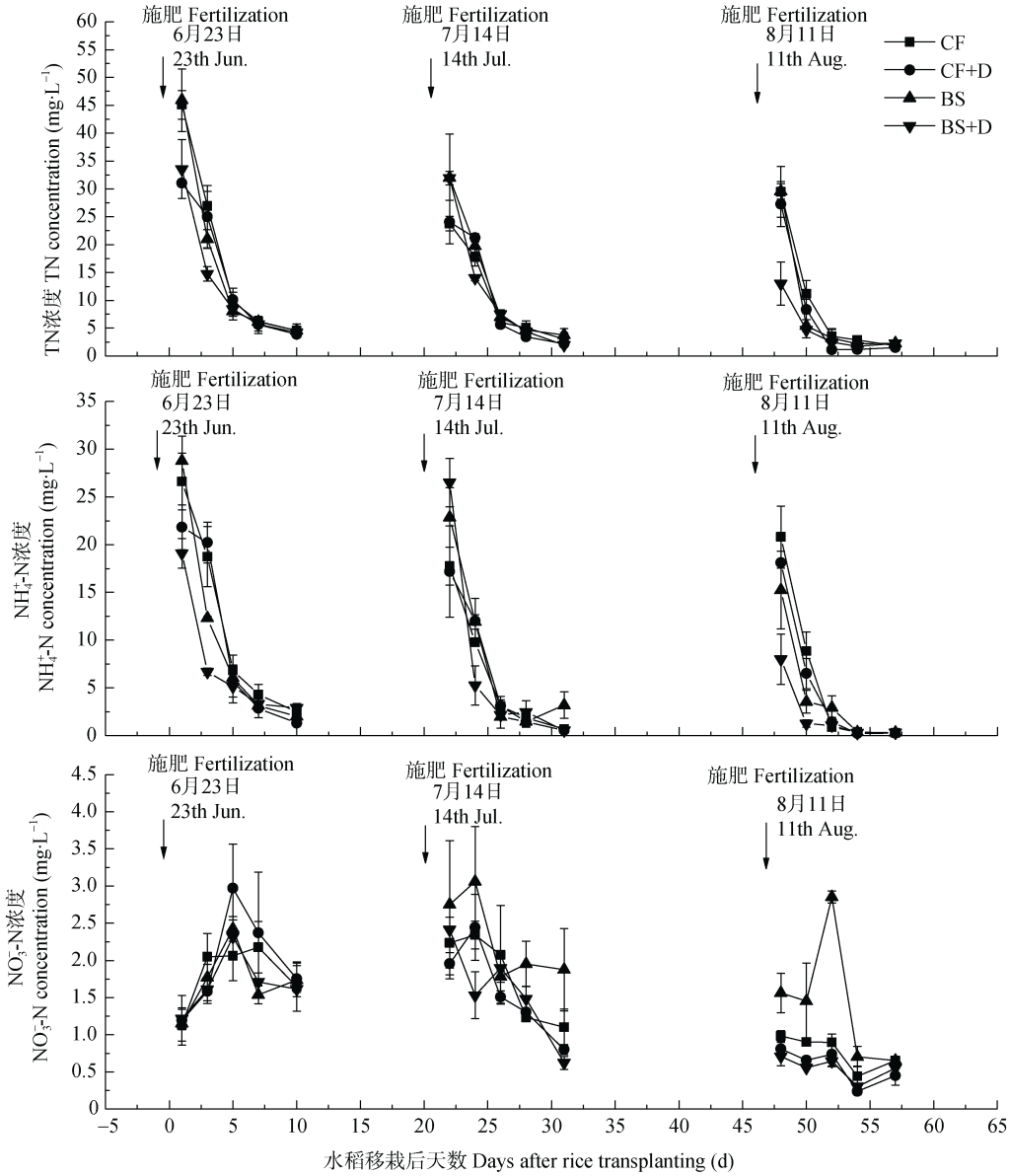

图 2 浮萍对沼液施用条件下稻田田面水总氮(TN)、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of total nitrogen (TN), NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations in surface water of paddy field with or without duckweed under biogas slurry application

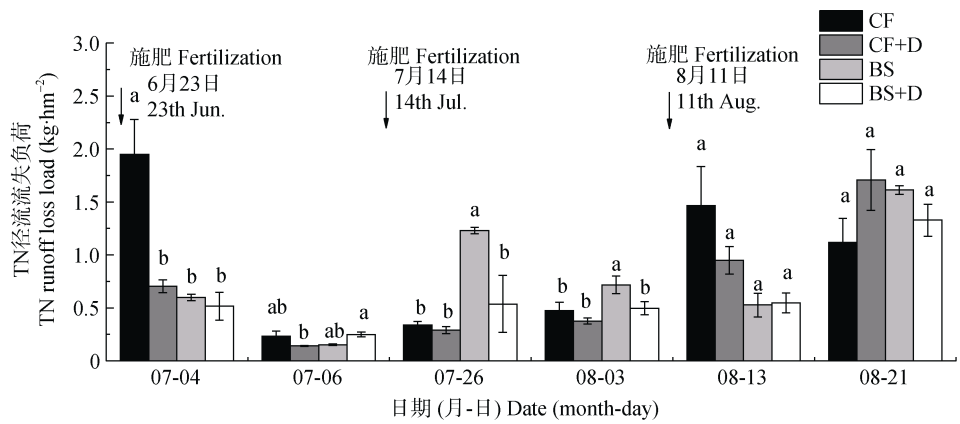

图 3 浮萍对沼液施用条件下稻田总氮(TN)径流流失动态变化

Fig. 3 Dynamic change of total nitrogen (TN) runoff loss in paddy field with or without duckweed under biogas slurry application

不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

表 2　浮萍对沼液施用条件下稻田氮素总径流流失负荷

Table 2　Total runoff loss load of nitrogen in paddy field with or without duckweed under biogas slurry application

处理 Treatment	总氮 Total nitrogen		NH_4^+-N ($kg \cdot hm^{-2}$)	NO_3^--N ($kg \cdot hm^{-2}$)
	流失负荷 Loss load ($kg \cdot hm^{-2}$)	占施氮比 Proportion of N application (%)		
CF	5.84±0.47a	1.95±0.14a	0.72±0.08a	2.13±0.45a
CF+D	4.17±0.17bc	1.39±0.24bc	0.99±0.13a	1.73±0.24ab
BS	5.27±1.07ab	1.76±0.11ab	1.04±0.12a	1.78±0.25ab
BS+D	3.67±0.79c	1.22±0.26c	0.71±0.18a	1.44±0.18b

不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

2.3　稻田氮素径流流失风险分析

为了能够更好地评估浮萍对沼液施用条件下不同施肥时期稻田氮素流失风险, 假设每次施肥后 1 d、3 d、5 d、7 d 产生相同的径流排水量, 用此排水量与施肥后田面水氮素浓度的乘积来估算[36]稻田 TN 流失负荷并进行分析。

上海地区多年降水量约为 1 200 mm, 6—8 月降水总量 450~480 mm, 而此时是稻田施肥的关键时期, 也是试验区大到暴雨最集中的月份, 极易产生径流。本研究中, 径流排水口高出土壤 10 cm, 田面水高度一般为 8 cm 左右, 连续降雨量大于 20 mm 后就会产生径流。现假设径流排水量为 10 mm, 不同施肥时期 TN 流失负荷如表 3 所示。结果表明, CF、CF+D、BS、BS+D 处理的 TN 流失负荷在第 1 次施肥后的 1 d 为 3.11~4.59 $kg \cdot hm^{-2}$, 施肥后 3 d、5 d 和 7 d 降为施肥后 1 d 的 45.7%~80.5%、17.5%~44.8%和 13.4%~26.5%; 第 2 次施肥后 1 d 为 2.05~3.19 $kg \cdot hm^{-2}$, 施肥后 5 d、7 d 降为施肥后 1 d 的 23.4%~34.1%和 13.8%~25.4%; 第 3 次施肥后 1 d 为 0.89~2.95 $kg \cdot hm^{-2}$, 施肥后 5 d、7 d 降为施肥后 1 d 的 4.1%~28.1%和 4.4%~20.0%。TN 的流失负荷随时间推移逐渐降低。当径流排水与施肥时间越接近, TN 流失风险越大。此外, CF、CF+D、BS、BS+D 处理在 3 次施肥后产生 10 mm 的径流排水量的情况下 4 次测定的 TN 流失总负荷分别为 18.77 $kg \cdot hm^{-2}$、17.32 $kg \cdot hm^{-2}$、17.13 $kg \cdot hm^{-2}$、14.77 $kg \cdot hm^{-2}$。其中, 相比于 CF 处理, CF+D、BS 和 BS+D 处理的 TN 流失负荷分别减少 7.7%、8.7%和 21.3%。沼液代替化肥灌施稻田可以减少约 9%的 TN 流失负荷, 而添加浮萍可以减少约 8%~22%的 TN 流失负荷, 因此在沼液中添加浮萍对于减少稻田 TN 流失负荷的效果更明显。

2.4　沼液施用条件下添加浮萍对稻田土壤及水稻 Cu 和 Pb 含量的影响

2.4.1　对土壤 Cu 和 Pb 含量的影响

由表 4 可知, 土壤 Cu 和 Pb 全量在各处理间差异不显著, 含量为 22.65~24.38 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 48.45~

表 3　假设产生 10 mm 径流排水量浮萍对沼液施用条件下不同施肥时期稻田总氮的流失负荷动态变化

Table 3　Dynamic changes of total nitrogen loss load at different fertilization stages under assumed 10 mm runoff discharge

$kg \cdot hm^{-2}$

处理 Treatment	第 1 次施肥后天数 Days after the first fertilization (d)				第 2 次施肥后天数 Days after the second fertilization (d)				第 3 次施肥后天数 Days after the third fertilization (d)			
	1	3	5	7	1	3	5	7	1	3	5	7
CF	4.51	2.69	0.98	0.62	2.38	1.77	0.60	0.51	2.95	1.12	0.35	0.29
CF+D	3.11	2.50	1.39	0.82	2.40	2.12	0.57	0.61	2.73	0.84	0.11	0.12
BS	4.59	2.10	0.80	0.61	2.05	1.98	0.70	0.47	2.10	1.05	0.46	0.22
BS+D	3.36	2.43	0.84	0.57	3.19	1.40	0.75	0.44	0.89	0.47	0.25	0.18

表 4　浮萍对沼液施用条件下稻田土壤 Cu 和 Pb 全量和有效态含量

Table 4　Total and available contents of Cu and Pb in soils of paddy field with or without duckweed under biogas slurry application

$mg \cdot kg^{-1}$

处理 Treatment	全 Cu Total Cu	有效铜 Available Cu	全 Pb Total Pb	有效铅 Available Pb
CF	24.38±0.67a	5.01±0.19b	53.28±0.55a	2.68±0.15b
CF+D	23.35±0.26a	5.80±0.53ab	51.57±1.06a	3.03±0.27ab
BS	22.66±2.21a	5.46±0.59ab	48.45±4.99a	3.09±0.25ab
BS+D	22.65±1.82a	5.94±0.21a	49.05±4.97a	3.15±0.22a

同列不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

53.28 mg·kg^{-1}。一年内沼液施用不会显著增加土壤 Cu 和 Pb 全量。相比于 CF 处理，CF+D 和 BS+D 处理的土壤 Cu 和 Pb 全量均有一定程度的减少。

BS+D 处理土壤有效铜含量比 CF 处理显著高 18.6%，但与 BS、CF+D 处理间差异不显著。BS+D 处理土壤中有效铅含量最高，比 CF 处理显著提高 17.5%，而与 BS、CF+D 处理间差异不显著。浮萍添加虽然不会增加土壤 Cu 和 Pb 全量含量，但能增加土壤 Cu 和 Pb 的有效态含量。

2.4.2 对水稻植株 Cu 和 Pb 含量的影响

不同处理对水稻籽粒和秸秆 Cu 和 Pb 含量的影响如图 4 所示。与 CF 和 CF+D 处理相比，BS 没有显著增加水稻籽粒 Cu 含量，但 BS+D 处理籽粒 Cu 含量较 BS 处理显著减少 41.05%。不同处理下秸秆 Cu 含量差异不显著。

水稻籽粒 Pb 含量平均仅为秸秆的 13%。不同处理间籽粒和秸秆中 Pb 的含量均无显著差异，但添加浮萍后，籽粒和秸秆中 Pb 含量均有一定程度的降低。说明施用沼液不会影响水稻籽粒和秸秆的 Pb 含量，而浮萍具有降低水稻植株 Pb 含量的潜力。

2.5 土壤、植株重金属与土壤理化性质的相关性分析

相关性分析可知(图 5)，土壤有机质与土壤 TN 极显著正相关(R^2=0.74)；土壤 Cu 与土壤 Pb(R^2=0.96)和秸秆 Cu(R^2=0.72)均呈极显著正相关、与土壤 TP 显著正相关；土壤 Pb 与秸秆 Pb 显著负相关、与籽粒 Pb 显著正相关；土壤有效铅与有效铜极显著正相关；土壤 pH 与土壤有效铜和土壤有效铅负相关，但未达显著水平；土壤有机质与土壤有效铅和土壤总铅均呈正相关，但未达显著水平。

3 讨论

3.1 沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失的影响

本研究通过监测稻田田面水和径流水中氮素变化评价了浮萍对沼液施用条件下稻田氮素流失的影响。结果表明，田面水 TN 和 NH_4^+-N 浓度在施肥 3 d 后明显降低，到第 5 d 已降至峰值的 30%以下，说明施肥后 3 d 是控制稻田氮素流失的关键时期，应当避免在 3 d 内预报有大到暴雨的时段施肥。这与王子臣等[37]结论相近。沼液施用条件下添加浮萍田面水 TN 平均浓度最低，降雨事件导致的氮流失风险最低。而田面水 NO_3^--N 浓度峰值低于 NH_4^+-N 浓度峰值，且表现出 3~7 d 滞后性。主要原因是稻田淹水条件下硝化作用微弱、NH_4^+-N 难转化为 NO_3^--N，其次 NH_4^+-N 经过氨挥发、植物吸收等作用，能转化为 NO_3^--N 的数量也较少。试验表明 BS+D 处理 TN 流失负荷显著低于其他 3 种处理，通过估算也得出同样的结果，说明沼液施用条件下添加浮萍可减少 TN 流失风险。李华等[38]研究结果也表明，稻田中大量生长的浮萍可加快田面水尿素态氮的水解过程，稻田田面水中浮萍既能调节氮素供应水平，又可降低氮素流失风险。而沈根祥等[28]研究表明，在夏季，水体中 TN 通过气态氨挥发、浮萍吸收吸附的 NH_4^+-N 和 NO_x^--N 得以去除，分别占 TN 总去除量的 30.5%、15.9%和 53.6%。因此，在浮萍添加后，沼液施用条件下稻田氮素径流流失呈现减少趋势可能是由于浮萍吸收了较多的 NH_4^+-N 和 NO_x^--N，从而使田面水中 TN 含量降低。

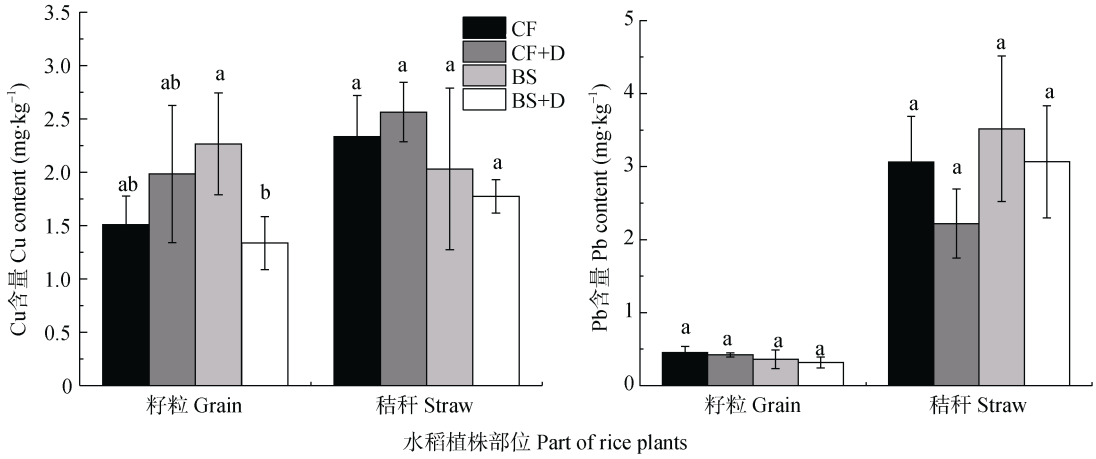

图 4 浮萍对沼液施用条件下水稻籽粒和秸秆的 Cu 和 Pb 含量

Fig. 4 Cu and Pb contents in rice grain and straw under treatments of duckweed and biogas slurry application

不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

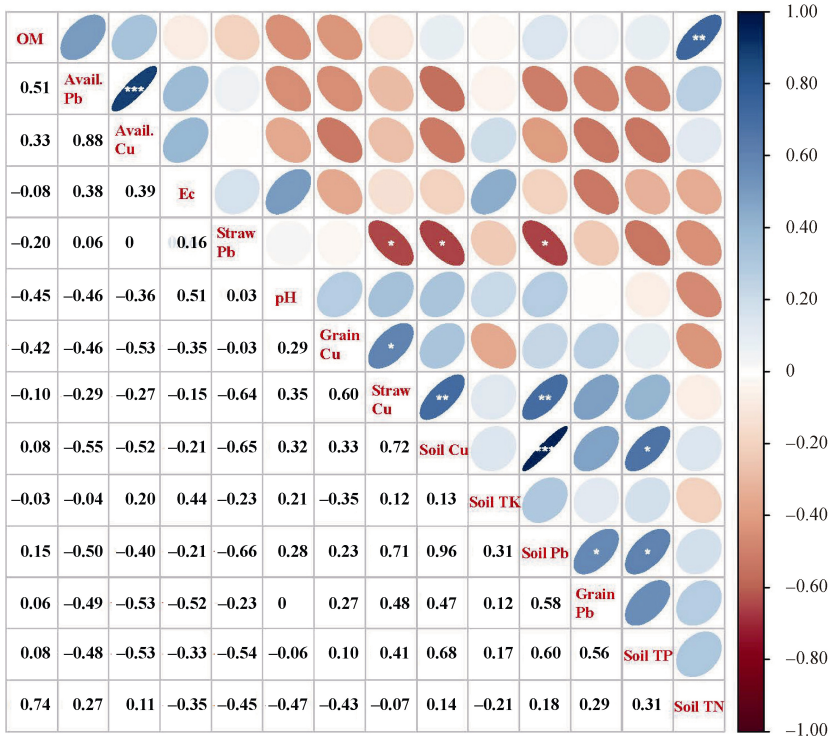

图 5　稻田土壤、水稻植株重金属含量与土壤理化性质的相关性

Fig. 5　Correlation analysis of soil and rice plant heavy metals contents and soil physicochemical properties of paddy field

Soil TN: 土壤全氮; Soil TP: 土壤全磷; Soil TK: 土壤全钾; Ec: 电导率; OM: 土壤有机质; Soil Pb: 土壤总铅; Soil Cu: 土壤总铜; Avail Pb: 土壤有效铅; Avail Cu: 土壤有效铜; Grain Cu: 籽粒铜; Grain Pb: 籽粒铅; Straw Pb: 秸秆铅; Straw Cu: 秸秆铜。Soil TN: soil total nitrogen content; Soil TP: soil total phosphorus content; Soil TK: soil total potassium content; Ec: soil electrical conductivity; OM: soil organic matter content; Soil Pb: soil Pb content; Soil Cu: soil Cu content; Avail Pb: soil available Pb content; Avail Cu: soil available Cu content; Grain Cu: grain Cu content; Grain Pb: grain Pb content; Straw Pb: straw Pb content; Straw Cu: straw Cu content.

3.2　沼液施用条件下添加浮萍对稻田土壤和水稻 Cu 和 Pb 含量的影响

从本试验结果看，沼液施用条件下，土壤和水稻籽粒、秸秆 Cu 和 Pb 含量并没有明显大于常规化肥处理，这与史一鸣[39]和黄继川等[40]研究表明在稻田施用沼液对土壤、植株重金属 Cu 和 Pb 没有明显积累甚至表现出下降基本一致。因此适量的沼液添加能有效实现沼液的资源化利用，且短期内不会对土壤和植物造成重金属污染风险[41]。同时本试验研究结果表明，添加浮萍不会显著增加土壤和水稻籽粒、秸秆全 Cu 和全 Pb 含量，这与李天煜[25]和谷兆萍[42]研究得出浮萍具有吸附重金属作用的研究结果相近。虽然沼液施用条件下添加浮萍不会增加土壤全 Cu 和全 Pb 含量，但却显著提高了土壤有效态 Cu 和 Pb 含量，这可能是因为沼液和浮萍的联合作用增加了土壤有机质，降低了土壤 pH。而土壤增加的这部分有效态 Cu 和 Pb 并未被水稻地上部分吸收，可能与浮萍快速繁殖并吸收有关。王强[43]研究就表明，浮萍对水中 Pb^{2+} 和 Cu^{2+}的去除率分别为 97.83%和 87.11%。

相关性分析表明，土壤有效态 Cu 和 Pb 与有机质正相关，与 pH 负相关，这与目前大部分研究结果一致[44-45]。在本试验中，BS+D 处理有机质含量高于其他 3 种处理，土壤 pH 低于其他 3 种处理。钟晓兰等[45]通过通径系数、相关系数和决策系数评价，发现有机质对金属有效态含量有较大的正向作用。姚荣江等[44]研究认为土壤 Pb 有效态与有机质呈显著正相关。这可能与土壤有机质中含有较高的富里酸有关。土壤有机质主要成分是腐殖质(以胡敏酸和富里酸为主)，其对重金属有效性的影响通过静电吸附、络合、螯合等作用来实现[46]，其中胡敏酸和胡敏素与金属形成的络合物是不易溶的，但富里酸和金属的络合物易溶，富里酸呈强酸性，移动性大，能显著促进污染土壤重金属的解吸，从而提高其有效性[47-48]。而当 pH 升高后，金属易于生成沉淀而降低有效性[49]。

3.3　沼液全量替代化肥和浮萍添加对环境重金属污染风险评估

为了进行重金属安全性分析，将重金属数据与国家相关标准进行对比。根据《土壤环境质量》GB 15618—2018，土壤污染物限量标准为 Cu≤100 $mg \cdot kg^{-1}$、Pb≤240 $mg \cdot kg^{-1}$。本研究中土壤 Cu 和 Pb 全量含量均低于此标准，土壤 Cu 和 Pb 污染风

险低。GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》的水稻籽粒 Pb 标准为≤0.2 mg·kg^{-1}, GB 15199—1994《食品中铜限量卫生标准》的粮食 Cu 限值为≤10 mg·kg^{-1}。本研究中水稻籽粒 Pb 含量超标, 籽粒 Cu 含量符合标准。Pb 超过限值可能是因为在试验区土壤有效态 Pb 含量相对较高, 水稻易从土壤中吸收 Pb 从而在籽粒中对 Pb 产生了富集, 同时也可能与试验区水稻的品种相关; 但另一方面, 添加浮萍的处理(CF+D 和 BS+D 处理)相较于不加浮萍的处理(CF 和 BS 处理)水稻籽粒和秸秆中 Pb 含量均有一定程度的减少。

根据沼液和浮萍 Cu 和 Pb 含量, 计算得出整个水稻季, 随沼液灌溉进入稻田环境的 Cu 为 209.99 g·hm^{-2}, Pb 为 0.759 g·hm^{-2}; 随浮萍进入稻田环境的 Cu 为 1.775 g·hm^{-2}, Pb 为 0.735 g·hm^{-2}, 而耕层土 Cu 为 54.36~63.41 kg·hm^{-2}, Pb 为 116.28~133.54 kg·hm^{-2}。假设沼液和浮萍中的 Cu 和 Pb 全部进入土壤, 则随沼液进入土壤的 Cu 和 Pb 分别占土壤 Cu 和 Pb 总量的 0.33%~0.38%和 0.000 56%~0.000 65%, 随浮萍进入土壤中的 Cu 和 Pb 分别占土壤 Cu 和 Pb 总量的 0.002 8%~0.003 3%和 0.000 56%~0.000 65%。因此, 短期内沼液施用及添加浮萍不会显著增加环境中 Cu 和 Pb 含量。

4 结论

在稻田中添加浮萍能够显著降低田面水 TN 含量, 施用沼液时添加浮萍稻田径流水氮素流失负荷为 3.67 kg·hm^{-2}, 与常规施用化肥相比降低 37.2%, 施肥后 3 d 是控制稻田氮素流失的关键时期。

不同处理间土壤、水稻秸秆 Cu 和 Pb 含量无显著差异, 但施用沼液时添加浮萍土壤 Cu 和 Pb 有效态含量较化肥处理显著增加 18.6%和 17.5%, BS+D 处理籽粒 Cu 含量较 BS 处理显著减少 41.1%。

综合比较而言, 在用沼液等氮替代化肥时添加浮萍可减少当季氮素流失风险, 但对于连续沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失影响和重金属的超标风险需进一步研究。

参考文献 References

[1] 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 L Q, XIA X J, HU Q Y, 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

[2] 杨诗贵, 洪宁, 李铸, 等. 沼液施用背景下稻田土壤养分的含量特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 239–244
YANG S G, HONG N, LI Z, et al. Characteristics of soil nutrient content in paddy field under biogas slurry application[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 239–244

[3] GARG R N, PATHAK H, DAS D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 107(1/2/3): 1–9

[4] 周杨, 章明奎. 长三角城郊区沼液化学组分特点及其农用重金属污染风险评价[J]. 中国农学通报, 2016, 32(20): 101–106
ZHOU Y, ZHANG M K. Characteristics of chemical component and agricultural potential risk assessment of heavy metals of biogas slurry in suburban areas of Yangtze Delta[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(20): 101–106

[5] OMAR A E D K, BELAL E B, EL-ABD A E N A. Effects of foliar application with compost tea and filtrate biogas slurry liquid on yield and fruit quality of Washington navel orange (*Citrus* sinenesis Osbeck) trees[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, 62(7): 767–772

[6] WU J, YANG Q, YANG G, et al. Effects of biogas slurry on yield and quality of oil-seed rape[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(13): 2084–2098

[7] 杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1566–1572
YANG R, SUN Q P, ZHAO H Y, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1566–1572

[8] 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1328–1336
JIANG L N, WANG Q, CHEN D J, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1328–1336

[9] 倪亮, 孙广辉, 罗光恩, 等. 沼液灌溉对土壤质量的影响[J]. 土壤, 2008, (4): 608–611
NI L, SUN G H, LUO G E, et al. Effect of marsh gas sewage irrigation on soil quality[J]. Soils, 2008, (4): 608–611

[10] LYU W L, WU J, GOU S Z, et al. The research of biogas slurry on yield and safety[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71/78: 3142–3146

[11] 王玮, 孙岩斌, 周祺, 等. 国内畜禽厌氧消化沼液还田研究进展[J]. 中国沼气, 2015, 33(2): 51–57
WANG W, SUN Y B, ZHOU Q, et al. A review on irrigation of biogas slurry from livestock manure anaerobic fermentation in China[J]. China Biogas, 2015, 33(2): 51–57

[12] 赵志鹏, 曹东杰, 谢志奎, 等. 金山区水稻良种补贴政策实施效果及优化建议[J]. 上海农业学报, 2013, 29(3): 82–85
ZHAO Z P, CAO D J, XIE Z K, et al. The implementing effect and improvement proposal of subsidy policy of superior rice cultivars in Jinshan District of Shanghai[J]. Acta Agri-

culturae Shanghai, 2013, 29(3): 82–85

[13] 张振宇. 上海农业碳排估算、结构特征及经济脱钩弹性[J]. 上海农业学报, 2016, 32(3): 150–154
ZHANG Z Y. Shanghai agricultural carbon emission: Estimation, structure and economic decoupling elasticity[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2016, 32(3): 150–154

[14] 曹其炜, 茅国芳, 吴永兴. 沪郊农田化肥施用特点及其发展趋势探讨[J]. 上海农业学报, 2008, 24(4): 20–24
CAO Q W, MAO G F, WU Y X. Study on the characteristics and development trend of fertilizer application in the farmland of Shanghai suburb[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2008, 24(4): 20–24

[15] 王玉军, 刘存, 周东美, 等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465–1473
WANG Y J, LIU C, ZHOU D M, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: Discussion[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1465–1473

[16] MUYUMBA D K, LIENARD A, MAHY G, et al. Characterization of soil-plant systems in the hills of the copper belt in Katanga. A review[J]. Biotechnologie, Agronomie Societe et Environnement, 2015, 19(2): 204–214

[17] SHAHID M, DUMAT C, KHALID S, et al. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system[J]. Reviews of Environmental Contamination & Toxicology, 2016, 241: 73–137

[18] 赵江宁, 王云霞, 沈春晓, 等. 土壤铜污染对水稻产量形成的影响: 5 年定位试验[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2073–2081
ZHAO J N, WANG Y X, SHEN C X, et al. Effect of soil copper contamination on rice yield formation: A 5-year located experiment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2073–2081

[19] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692–703
ZHANG X M, ZHANG X Y, ZHONG T Y, et al. Study on the enrichment and spatial distribution of heavy metals in farmland soils in China[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 692–703

[20] 佟亚欧, 金兰淑. 土壤铅污染现状及钝化修复技术探讨[J]. 农业科技与装备, 2010, (6): 31–32
TONG Y O, JIN L S. Discussion on the current soil lead pollution and inactivation restoring technology[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2010, (6): 31–32

[21] 吴建勋, 张姗姗. Cr、Co、Pb 单一胁迫对浮萍 SOD、POD、MDA 的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(15): 188–194
WU J X, ZHANG S S. Effect of metal icon Cr, Co, Pb on SOD, POD, MDA in *Lemna minor* L.[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(15): 188–194

[22] CAICEDO J. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*)[J]. Water Research, 2000, 34(15): 3829–3835

[23] ORON G, WILLERS H. Effect of wastes quality on treatment efficiency with duckweed[M]//Water Pollution Research and Control. Brighton: Elsevier, 1988: 639–645

[24] HOU W, XIAO C, SONG G, et al. Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (*Lemna minor*)[J]. Plant Physiology Biochemistry (Paris), 2007, 45(1): 62–69

[25] 李天煜. 稀脉萍(*Lemna aequinoctialis*)和紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)的重金属生态毒理学研究[D]: 武汉: 武汉大学, 2003
LI T Y. Ecotoxicological of heavy metals on *Lemna aequinoctialis* and *Spirodela polyrrhiza*[D].Wuhan: Wuhan University, 2003

[26] ORON G, PORATH D, WILDSCHUT L R. Wastewater treatment and renovation by different duckweed species[J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(2): 247–263

[27] BASIGLINI E, PINTORE M, FORNI C. Effects of treated industrial wastewaters and temperatures on growth and enzymatic activities of duckweed (*Lemna minor* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 153: 54–59

[28] 沈根祥, 徐介乐, 胡双庆, 等. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 42–47
SHEN G X, XU J L, HU S Q, et al. Nitrogen removal pathways in shallow-water duckweed-based wastewater treatment systems[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1): 42–47

[29] 唐利萍, 方扬, 靳艳玲, 等. 重金属镉超富集浮萍品种筛选及其对水体中镉的去除效果[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 830–836
TANG L P, FANG Y, JIN Y L, et al. Preliminary study on screening of cadmium hyperaccumulator duckweed strain and removal of cadmium in water[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(5): 830–836

[30] XU J L, SHEN G X. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 848–853

[31] 李妍, 席运官, 徐欣. 浮萍净化与资源化利用沼液初步研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(34): 16739–16740
LI Y, XI Y G, XU X. Initial study on purification and resource utilization of the biogas slurry by duckweed[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(34): 16739–16740

[32] 沈根祥. 利用浮萍净化氮磷污水机理及其优化工艺条件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
SHEN G X. Research on mechanism and technological conditions of nitrogen-phosphorus wastewater treatment by duckweed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005

[33] 于斌. 浮萍对污水中氮、磷去除作用的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010
YU B. Studies on effects of duckweed on removal of nitrogen and phosphorus from polluted water bodies[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010

[34] 李发生, 韩梅, 熊代群, 等. 不同浸提剂对几种典型土壤中重金属有效态的浸提效率研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 704–706

LI F S, HAN M, XIONG D Q, et al. Efficiency of some extractants for available heavy metals from several typical soils[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2003, 22(6): 704–706

[35] 沙之敏, 陈平, 曹林奎. 稻田径流量预测及氮磷流失估测方法[P]. 中国专利: 109117984, 2019-01-01.
SHA Z M, CHEN P, CAO L K. Prediction of runoff and estimation of nitrogen and phosphorus loss in rice field [P]. Chinese patent: 109117984, 2019-01-01

[36] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016
LI J. Effect of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorous losses from paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016

[37] 王子臣, 梁永红, 盛婧, 等. 稻田消解沼液工程措施的水环境风险分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 213–220
WANG Z C, LIANG Y H, SHENG J, et al. Analysis of water environment risk on biogas slurry disposal in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 213–220

[38] 李华, 陈英旭, 梁新强, 等. 浮萍对稻田田面水中氮素转化与可溶性氮的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 92–94
LI H, CHEN Y X, LIANG X Q, et al. Influence of duckweed on N conversion and dissolved N in floodwater after urea application into paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 92–94

[39] 史一鸣. 稻田生态系统消解沼液的潜力及风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2010
SHI Y M. The potential capacity for paddy field ecosystem to decontaminate biogas slurry and its risks assessment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010

[40] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤肥力及环境安全的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(10): 69–76
HUANG J C, PENG Z P, XU P Z, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on rice production, soil fertility and environmental safety[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(10): 69–76

[41] 赵麒淋, 伍钧, 陈璧瑕, 等. 施用沼液对土壤和玉米重金属累积的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 251–255
ZHAO Q L, WU J, CHEN B X, et al. Effect of biogas slurry on heavy metal accumulation of soil and maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 251–255

[42] 谷兆萍. 复合污染下浮萍(*Lemna minor* L.)对重金属吸收、富集特征和机理[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011
GU Z P. Heavy metal uptake, accumulation and mechanisms in duckweed (*Lemna minor* L.) under metal-combined pollution conditions[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011

[43] 王强. 漂浮植物浮萍对 Pb^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+}的吸附特征的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007
WANG Q. Biosorption characteristics for Pb^{2+}, Cu^{2+}, Mn^{2+} onto aquatic plant: *Lemna minor*[D]. Jinan: Shandong University, 2007

[44] 姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 沿海滩涂区土壤重金属含量分布及其有效态影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 287–298
YAO R J, YANG J S, XIE W P, et al. Content and bioavailability factors of soil heavy metals in mudflat coastal areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 287–298

[45] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 土壤有效态 Cd、Cu、Pb 的分布特征及影响因素研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 254–260
ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T, et al. Soil available Cd, Cu, Pb distribution characteristic and its influencing factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 254–260

[46] DEAN J R. Heavy metal bioavailability and bioaccessibility in soil[J]. Methods in Molecular Biology, 2010, 599: 15–36

[47] 王宏康. 土壤中若干有毒元素的环境质量基准研究[J]. 农业环境保护, 1993, (4): 162–165
WANG H K. Environmental quality standard of several toxic elements in siol[J]. Agro-Environmental Protection, 1993, (4): 162–165

[48] GUO X F, WEI Z B, PENN C J, et al. Effect of soil washing and liming on bioavailability of heavy metals in acid contaminated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(2): 432–441

[49] 孟昭福, 张增强, 张一平, 等. 几种污泥中重金属生物有效性及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 115–118
MENG Z F, ZHANG Z Q, ZHANG Y P, et al. Bioavailability of heavy metals and affecting factors in sewage sludge[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(1): 115–118