

生物炭和秸秆添加对海南热带水稻土氮素淋溶的影响

朱启林¹, 刘丽君¹, 张雪彬¹, 伍延正¹,
汤水荣¹, 曹明², 柯用春², 孟磊¹, 何秋香¹

(1.海南大学热带作物学院,海口 570228;2.三亚市南繁科学技术研究院,海南 三亚 572000)

摘要: 通过室内土柱模拟淋洗试验,研究不同水分条件下添加秸秆和生物炭对海南热带水稻土氮淋失的影响。物料添加设对照(CK)、添加生物炭(B)、生物炭+水稻秸秆(BCS)、水稻秸秆(CS)4个处理,培养水分设75%田间持水量(WHC,模拟旱作土壤)和淹水(模拟水田)2个水平。结果表明,生物炭和秸秆添加均可以提高土壤pH,增加土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷含量。75%WHC条件下,相比CK,BCS和CS处理显著增加土壤 NH_4^+-N 的淋失量,分别增加16.30%和48.56%,B处理无显著差异;CS处理增加土壤 NO_3^--N 淋失,BCS处理降低土壤 NO_3^--N 淋失,B处理对硝、铵态氮淋失无显著影响;BCS和CS处理显著增加土壤硝、铵态氮总量(S)淋失,B处理对S无显著影响。淹水条件下,相比CK,B处理降低土壤的 NH_4^+-N 和S的淋失,分别降低16.30%和12.81%,而对 NO_3^--N 淋失量无显著影响;CS处理土壤降低土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和S的淋失,分别降低19.26%、33.96%和22.37%;BCS处理降低土壤 NH_4^+-N 和S的淋失,分别降低14.52%和14.19%,但对 NO_3^--N 淋失影响不显著。综上,海南热带地区稻菜轮作种植模式下,旱作条件秸秆还田增加土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的淋失,但生物炭对硝、铵态氮淋失无影响;水田时,生物炭添加可以降低土壤 NH_4^+-N 淋失,对 NO_3^--N 无影响,秸秆还田后土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的淋失均降低。

关键词: 氮素淋溶; 秸秆还田; 生物炭; 水分条件

中图分类号:X704; S511

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0193-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.027

Effect of Biochar and Straw Addition on Nitrogen Leaching of Tropical Paddy Soil in Hainan

ZHU Qilin¹, LIU Lijun¹, ZHANG Xuebin¹, WU Yanzheng¹, TANG Shuirong¹,
CAO Ming², KE Yongchun², MENG Lei¹, HE Qiuxiang¹

(1.College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228;

2.Sanya Science and Technology Academy for Crop Winter Multiplication, Sanya, Hainan 572000)

Abstract: An indoor soil column simulation experiment was conducted to examine the effect of adding straw and biochar on the nitrogen leaching loss of Hainan tropical paddy soil under different moisture conditions. Four treatments were set up: control (CK), addition of biochar (B), biochar + rice straw (BCS), and rice straw (CS) at two moisture condition: 75% field water holding capacity (WHC, simulated dry farming soil) and flooding conditions (simulated paddy field). The results showed that both biochar and straw addition could increase soil pH, soil organic matter, total nitrogen, available potassium and available phosphorus contents. Under 75% WHC conditions, compared with CK, BCS and CS treatments significantly increased soil NH_4^+-N leaching by 16.30% and 48.56% respectively, and no significant difference was found in B treatment. The treatment of CS increased soil NO_3^--N leaching compared with CK, and BCS treatment reduced soil NO_3^--N leaching, while there was no significant difference in B treatment. BCS and CS treatments significantly increased soil nitrate-ammonium nitrogen (S) leaching compared with CK, while there was on significant effect in B treatment. Under flooding conditions, compared with CK, the leaching loss of NH_4^+-N and S in the soil was reduced by 16.30% and 12.81%, respectively, but had no significant effect on the

收稿日期:2021-01-20

资助项目:国家自然科学基金项目(42067008,41701267);海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC493)

第一作者:朱启林(1991—),男,在读博士研究生,主要从事土壤氮循环研究。E-mail:1017023948@qq.com

通信作者:何秋香(1973—),女,讲师,主要从事热区土壤质量调控与物质循环研究。E-mail:121988267@qq.com

NO_3^- -N leaching loss in B treatment. CS treatment significantly decreased the leaching loss of soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and S by 19.26%, 33.96% and 22.37%, respectively. BCS treatment reduced the leaching loss of soil NH_4^+ -N and S by 14.52% and 14.19%, respectively, but had no influence of NO_3^- -N leaching. In summary, returning straw to the field under dry farming conditions would increase soil leaching loss of NH_4^+ -N and NO_3^- -N, but biochar had no effect on nitrate ammonium leaching under the rice-vegetable rotation planting model in tropical areas of Hainan. In the paddy field, biochar could reduce the leaching loss of NH_4^+ -N, but had no effect on NO_3^- -N, while the straw could decrease the leaching loss of NH_4^+ -N and NO_3^- -N.

Keywords: nitrogen leaching; straw returning to the field; biochar; water conditions

淋溶是土壤氮素损失的重要途径,施入农田土壤的氮肥约有 5.0%~41.9%通过淋溶途径流失^[1-2]。Lin 等^[3]通过模型研究发现,人为输入农业系统中的氮素 19%以硝态氮淋溶损失,氮素的淋溶不仅造成氮浪费,也引起诸多环境问题。因此,如何改善土壤管理措施,减少氮素淋溶损失,降低环境污染风险,是我国农田生态系统以及环境保护领域急需解决的问题^[4-5]。

有研究^[6-7]表明,秸秆还田和添加生物炭能够提高土壤 pH,增强土壤保水保肥能力,改善土壤状况,同时能够显著影响土壤矿质氮含量。生物炭是生物质在高温条件下,部分或完全缺氧条件下裂解产生的一类有机物质,是一种新型的土壤吸附剂和改良剂^[8]。周志红等^[9]研究指出,适当添加生物炭可以大幅度降低土壤氮素淋失作用。虽然生物炭对土壤氮的固持作用已得到广泛认可,但对氮素不同形态的固持能力及其作用机制仍不确定。农作物秸秆是农业生产中重要的肥料资源,秸秆还田能够提高土壤矿质氮含量,但对氮素固持作用存在异议。崔思远等^[10]研究发现,秸秆还田后增加了水稻田土壤渗漏液中硝态氮浓度;胡宏祥等^[11]则认为,秸秆还田有利于降低土壤淋溶液中氮含量,减少土壤氮淋失。因为不同学者的研究均是基于特定的条件,而秸秆还田后,其对氮素迁移过程的影响是一个复杂的过程,因此尚未得出统一结论。关于生物炭和秸秆添加对土壤氮素淋失影响的研究^[12-14]多见于温带和亚热带地区,且大部分不考虑土壤水分作用的影响。海南地区由于其充沛的水热条件,使得其土壤矿物分解彻底,物质淋溶强烈,形成保肥能力低的砖红壤。稻-菜轮作是海南地区典型的种植模式,水分在种植过程中起到重要的调控作用。

前期研究^[15-16]证实,生物炭能改善土壤酸度,增加保肥性,促进硝化,增加土壤硝态氮含量,是否进而增加氮素淋溶风险? 秸秆直接还田后,所引起的土壤氮素转化是否会因为添加生物炭而改变? 因此,了解生物炭和秸秆添加对海南热带水稻土氮素淋失规律,以及氮的主要淋失形态,对海南地区氮素调控、减少土壤氮素淋溶损失具有重要意义。基于此,本研究采

用室内土柱方法,研究不同水分条件下生物炭和秸秆添加对海南热带水稻土氮素淋溶损失的影响,旨在为减少海南地区土壤氮素损失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自海南省儋州市新盈农场玄武岩母质发育的水稻土,此地常年进行水稻-蔬菜轮作。于 2019 年 4 月按照“S”形 5 点采样法采集水稻田耕层土壤(0—20 cm),将田间采集的土样充分混匀,剔除土样中的根茬、动物残体和石块等杂物,风干备用。取部分风干土过 20 目和 100 目筛进行理化性质分析,其中土壤 pH 4.69,全氮含量 1.38 g/kg,有机质含量 8.92 g/kg,碱解 N 含量 51.07 mg/kg,速效 P 含量 5.91 mg/kg,速效 K 含量 139.84 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 10 月在海南大学进行。试验设 4 个处理,分别为:对照(CK);添加生物炭(B),生物炭用量为风干土质量的 1.5%;生物炭+水稻秸秆(BCS),生物炭和秸秆的用量分别为风干土质量 0.75%和 2.25%;添加水稻秸秆(CS),秸秆用量为风干土质量 4.5%。生物炭为水稻在 500 °C 下厌氧裂解制备。每个处理在 75%持水量(WHC)和淹水条件下 2 个水分条件下培养,每个处理重复 3 次。75%田间持水量处理模拟最适水分环境,试验期间维持水分始终在 75% WHC;淹水处理是模拟水田环境,试验培养期间始终保持土表水层 2 cm。

1.3 渗漏试验装置

截取 PVC 管(直径为 11 cm,横截面积为 77.5 cm²),截取后的 PVC 管底端用尼龙网包裹,然后将不同处理土壤装入土柱,土柱底部装约 2 cm 厚的石英砂,在石英砂与土壤之间放置 1 张 300 目的纱网。土壤用 PVC 封盖盖住底部,在封盖底部打 1 个直径 0.5 cm 的小孔,用橡胶塞将排水管固定便于收集渗漏液,将土柱直立放在架子上。按照 1.1 g/cm³ 的田间土壤容重水平计算得到 20 cm 土柱需要的干土质量,将称量好的土壤装进 PVC 管,形成约 20 cm 的模拟土柱,土柱总长各处理统一为 30 cm,然后在土柱

表面放置 1 张滤纸片,以保证加水时表面平整,水分能够均匀地向土柱中渗透。培养开始时记录各土柱总质量,培养期间按照所记录质量每 3 天补水 1 次。75% WHC 添加去离子水进行土壤活化。5 天后按 150 mg/kg N 风干土加入尿素溶液,尿素溶液用注射器注入土壤 2~3 cm 处。采用质量法控制加入水量(土壤最大持水量),每 3 天补水 1 次,在第 3,6,9,12,18,24,30 天测量渗漏液体积。

1.4 分析指标与方法

土壤常规指标的测定方法参见《土壤农业化学分析方法》^[17]。

NH_4^+-N 和 NO_3^--N 测定: NH_4^+-N 含量采用靛酚兰比色法测定, NO_3^--N 含量采用紫外分光光度计(日本岛津)测定;土壤水渗漏量(mL)=每次收集淋溶液累加量; NO_3^--N 淋失量= NO_3^--N 淋失液浓度 \times 淋失液体积; NH_4^+-N 淋失量= NH_4^+-N 淋失液浓度 \times 淋失液体积。同时,计算淋

溶液 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 淋失量之和(S)。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 软件进行整理,作图采用 Origin 2018,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和显著性检验,检验方法采用 ANOVA 法,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 供试土壤理化分析

从表 1 可以看出,施用有机物料后,土壤养分和 pH 提高。相比 CK,土壤有机质和速效钾含量提高幅度分别达 84.43%~128.98%和 332.28%~799.86%。对比 75% WHC 条件和淹水处理,淹水后土壤 pH 显著高于 75% WHC,增幅为 23.04%~46.53%;碱解氮、速效钾和有效磷含量 75% WHC 高于淹水条件,增幅分别为 14.36%~27.17%,1.97%~33.43%和 543.97%~1 035.12%。淹水处理下,土壤养分淋失高于 75% WHC,其中,有效磷流失量比例最高。

表 1 供试土壤化学特性

水分条件	处理	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)
75% WHC	CK	4.47	8.35	0.72	70.70	131.17	65.61	9.02
	B	5.14	19.12	1.13	76.89	665.17	91.25	10.04
	BCS	5.60	16.76	1.20	81.46	870.15	81.03	10.24
	CS	5.71	15.40	1.21	93.00	1180.34	87.43	11.61
	CK	6.55	8.10	0.71	63.29	128.64	5.78	10.09
淹水处理	B	6.85	17.48	1.12	60.46	556.09	14.17	10.68
	BCS	6.89	16.54	1.11	71.23	716.89	11.59	10.84
	CS	7.04	16.40	1.24	77.56	884.60	11.52	10.93

2.2 土壤渗漏液中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度变化

土壤渗漏液中, NH_4^+-N 浓度随着时间的延长而降低(图 1),75% WHC 下,B 处理土壤 NH_4^+-N 浓度在 12 天时最低,18 天时浓度升高,之后缓慢降低;在第 3,6,9 天时,CK 处理 NH_4^+-N 浓度最

低,BSC 和 CS 处理 NH_4^+-N 浓度最高。淹水处理下,渗漏液中 NH_4^+-N 浓度随着时间的增加而降低,第 3 天时,B 处理 NH_4^+-N 浓度最低,其中在 18 天时,CK、BSC 和 CS 浓度有升高趋势,且均高于 B 处理。

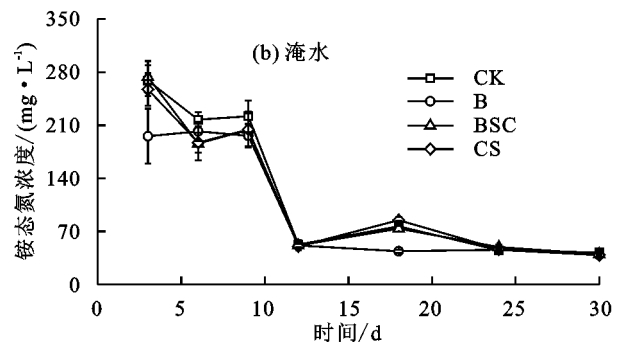
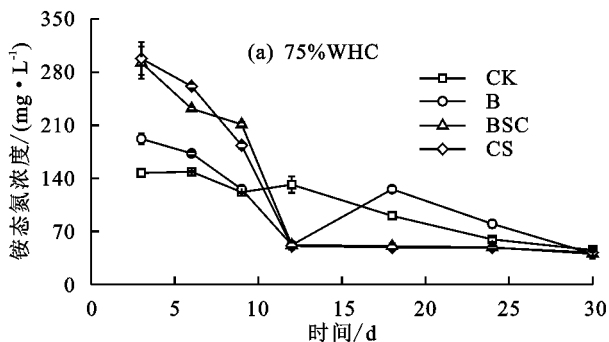


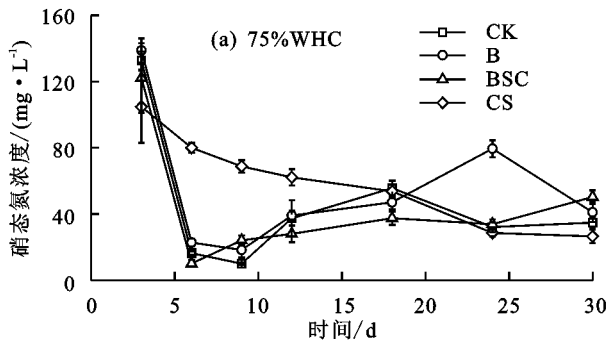
图 1 土壤渗漏液中 NH_4^+-N 浓度

75% WHC 和淹水处理下,土壤 NO_3^--N 流失浓度见图 2。

75% WHC 处理下,渗漏液中 NO_3^--N 浓度在第 3 天最高,而淹水处理条件下,第 3 天 NO_3^--N 浓度最低。75% WHC 处理中,添加秸秆(CS)

NO_3^--N 浓度随渗漏时间增加而降低,而空白处理(CK)、添加生物炭(B)和添加生物炭+秸秆(BSC) NO_3^--N 浓度在第 6~9 天浓度最低,B 处理在 24 天时显著升高。淹水处理下, NO_3^--N 浓度呈先升高后降低趋势,B、BSC 处理最高浓度出现在 9~12

天,CK、CS 处理在第 18 天时浓度最高,随渗漏时间



增长,CK 的浓度高于其他处理。

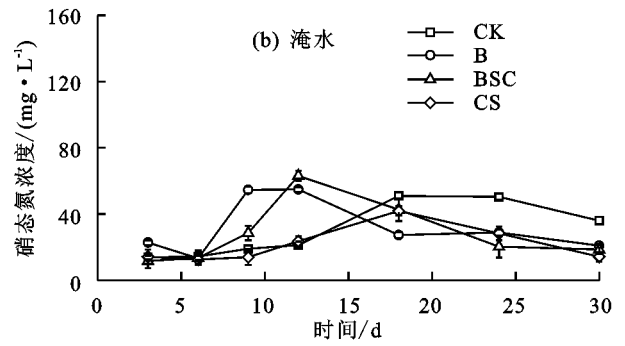
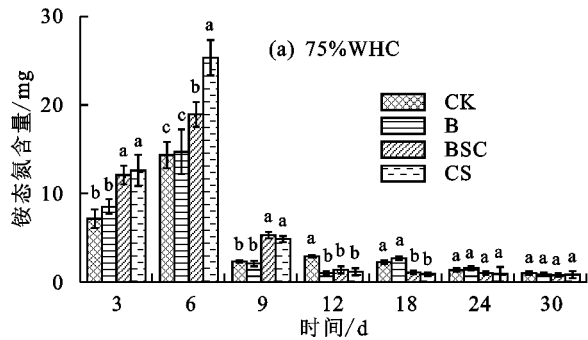


图 2 土壤渗漏液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度

2.3 土壤渗漏液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量

75% WHC 和淹水条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量随时间变化呈先升高后降低趋势(图 3),在 18 天之后,不同处理渗漏液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量无显著性差异。



75% WHC 条件下,第 3,6 天 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量表现为 $\text{CS} > \text{BSC} > \text{B} > \text{CK}$;在淹水条件下,第 3,6,9 天 CK 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量最高,其中第 6,9 天 B、BSC 和 CS 处理淋失量差异不显著。

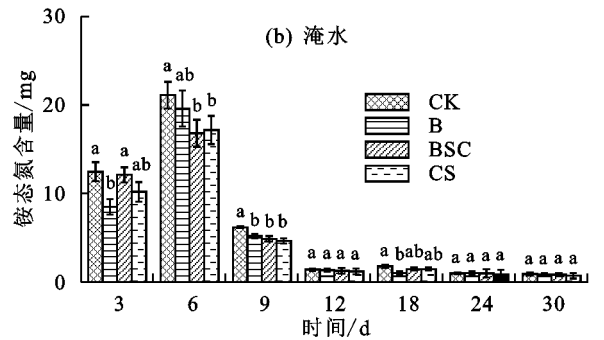


图 3 土壤渗漏液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量

从图 4 可以看出,整体上, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量随时间变化呈降低趋势。75% WHC 条件下,CS 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量呈先升高后降低趋势,淋失量在第 6 天最高,达 7.76 mg;在第 6,9,12 天,CS 处理

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量显著高于其他处理。淹水条件下,CK 在第 3,6,18,24,30 天 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量显著高于其他处理;在第 9,12 天,B 处理显著高于其他处理。

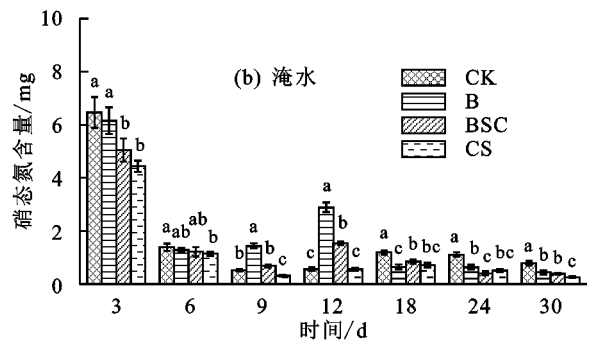
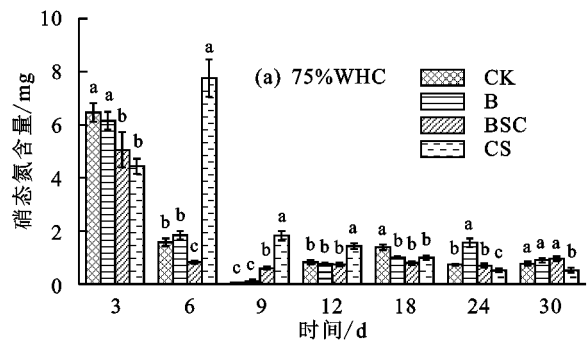


图 4 土壤渗漏液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量

2.4 不同水分和有机物添加对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量的影响

土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量见图 5。75% WHC 条件下, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量表现为 $\text{CS} > \text{CK} > \text{B} > \text{BCS}$,其中 CK 和 B 处理无显著差异,相比 CK,B、CS 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量分别增加 3.57% 和 48.15%,BCS 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量减少 18.14%。淹水条件下,CK 和 B 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量差异不显著,但显著高于 BSC 和 CS 处理,相比 CK,分别

降低 15.78% 和 33.96%,BSC 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量显著高于 CS。75% WHC 和淹水条件对比,CS 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失总量在 75% WHC 条件下显著高于淹水条件,淋失量增加 54.56%;CK、B 和 BCS 处理差异不显著。

75% WHC 条件土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失总量表现为 $\text{CS} > \text{BCS} > \text{B} > \text{CK}$,其中 CK 和 B 差异不显著,相比 CK,BCS 和 CS 处理分别增加 29.27% 和 48.72%;淹水条件下,CK 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失总量显著高于

其他处理,分别比 B、BCS 和 CS 处理增加 16.30%、14.52%和 19.26%。对比 75% WHC 和淹水条件,CK 和 B 处理 NH_4^+-N 淋失量淹水条件显著高于

75% WHC 条件,淹水条件分别增加 43.09%和 19.20%,CS 处理 NH_4^+-N 淋失量在 75% WHC 显著高于淹水条件,增加 22.32%。

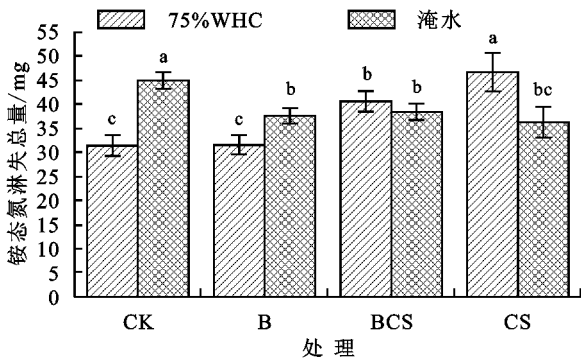
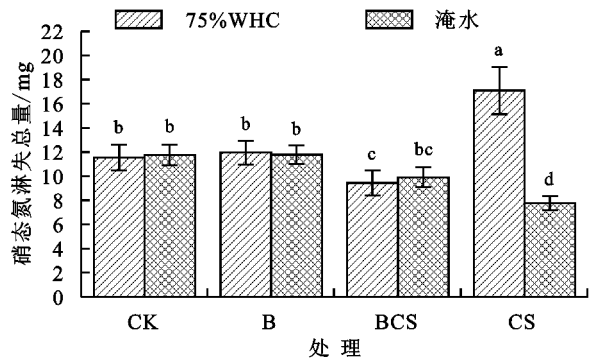


图 5 土壤渗漏液硝态氮和铵态氮淋失总量



2.5 不同水分和有机物添加对土壤无机氮淋失总量的影响

图 6 为土壤渗漏液硝、铵态氮(S)。75% WHC 条件下,BCS 和 CS 处理的 S 显著高于 CK,分别高出 16.3%和 48.56%,CK 和 B 处理差异不显著。淹水条件下,S 表现为 $\text{CK} > \text{B} > \text{BCS} > \text{CS}$,其中 B、BCS 和 CS 处理的 S 均显著低于 CK,分别降低 12.81%、14.79%和 22.37%。75% WHC 与淹水条件下对比发现,CK 和 B 处理淹水条件下的 S 显著高于 75% WHC,淋失量分别增加 31.83%和 13.44%,CS 处理淹水条件下显著低于 75% WHC,淋失量降低 31.12%。

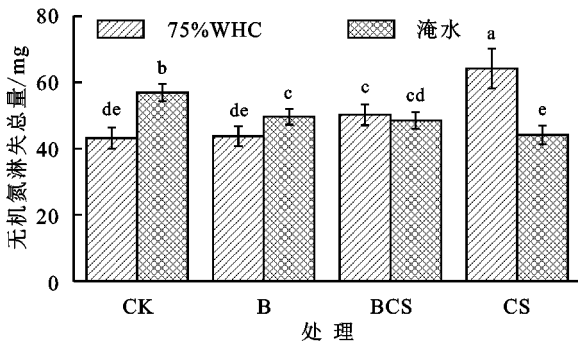


图 6 土壤渗漏液无机氮淋失总量

3 讨论

3.1 不同水分条件下生物炭和秸秆添加对土壤化学性质的影响

本研究显示,淹水条件下土壤 pH(6.55~7.04)高于 75% WHC 条件(4.47~5.71),赵旭等^[13]针对热带亚热带酸性土壤研究发现,土壤硝化作用产生 H^+ 是土壤酸化的主要途径。本研究在淹水条件下,土壤透气性差,导致土壤硝化作用缓慢,所以 H^+ 产生较 75% WHC 更少,同时因为长期淹水,淋溶作用更强烈,土壤本身因为淋溶作用带走部分 H^+ 离子,导致土壤 pH 升高。生物炭和秸秆的添加均提高土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷含量,原因在于生物炭和秸秆富含可溶性

矿物,添加土壤后这些养分也随之被带入土壤^[18];同时,土壤中添加生物炭和秸秆后,改善土壤孔隙结构,为微生物提供能量来源和住所,土壤微环境改善有利于提高土壤的保肥性能^[19]。

3.2 不同水分条件对土壤无机氮淋失的影响

NO_3^- 不易被土壤胶体吸附,易随水渗漏淋失,所以土壤水分是控制土壤氮素转化过程的重要因素之一,对土壤 N 淋溶过程产生强烈影响^[20]。本研究中,淹水和 75% WHC 条件下, NH_4^+-N 在第 3 天浓度最高(图 1),且 NH_4^+-N 淋失主要集中在前 3 次(0~9 天),主要因为施入土壤中的尿素在脲酶的作用下,首先转化成 NH_4^+-N ^[21],所以在淋溶前期, NH_4^+-N 淋失量高。75% WHC 条件下, NO_3^- —N 淋失浓度在第 3 天最高,而淹水条件下,第 3 天 NO_3^- —N 淋失浓度很低,可能原因是最佳持水量条件下,土壤透气状况良好,硝化微生物活性更高,硝化速率更快,前期土壤 NO_3^- —N 含量高,所以渗漏液中浓度高;同时,75% WHC 条件下土壤渗漏液量低于淹水条件,这是造成这一现象的另一原因。淹水条件下,土壤透气性差,土壤处于厌氧条件,尿素矿化和铵态氮硝化速率降低,且厌氧条件下,土壤发生异养硝化过程^[22],这些均导致淹水前期(0~6 天)硝态氮浓度低。

NO_3^- —N 随时间淋失量呈降低趋势,第 3 天最高, NH_4^+-N 先升高后降低,高峰出现在第 6 天。淹水条件下,土壤 NH_4^+-N 浓度并未高于 75% WHC 条件,土壤长期处于淹水状态,虽然 NH_4^+-N 在土壤中停留时间更长,但这也导致土壤氨挥发更强烈^[23],所以淹水条件下渗漏浓度和渗漏量较 75% WHC 条件均未升高;同时长期淹水导致土壤反硝化过程中 N_2O 排放更高^[24],所以淹水条件下,硝态氮淋失量也未高于 75% WHC。

3.3 生物炭和秸秆添加对旱地和水田土壤无机氮淋失的影响

土壤中添加生物炭和秸秆作为一种农田土壤调控措施,能够维持土壤有机质,减少土壤侵蚀^[25]。然而,根据土壤的通气状况以及无机氮和易分解有机碳的供应来看,添加秸秆可能会因改变硝化和反硝化过程而增加土壤 N 损失^[26]。本研究中,75% WHC 条件(模拟旱地土壤)下,秸秆的加入(CS)显著增加土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量,土壤的硝化作用强弱是控制土壤无机氮淋溶的主要因子,75% WHC 条件下,土壤处于最适含水量条件,此时有利于土壤硝化速率进行,导致硝化作用产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随水淋失严重^[27];另一方面,秸秆添加增加土壤透气性,随之土壤的有机氮矿化增加,土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高,且秸秆添加后导致淋溶液增加,进而引起无机氮淋失量增加^[28]。生物炭(B)添加并未引起土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的变化,虽然也引起土壤孔隙增加,但生物炭本身具有对无机氮的吸附作用,这可能是生物炭添加后未引起土壤无机氮淋失的一个重要原因。生物炭和秸秆配施(BCS)处理,降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量,说明生物炭和秸秆共同添加是减少土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失的一种有效手段^[29],原因在于秸秆添加后,土壤透气性虽然提高,但是生物炭增加土壤的持水能力,有效减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 随水流失;但也可能是生物炭和秸秆同时加入后,导致土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的淋失量增加(图 5),使硝化作用的底物减少,硝化作用产物 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量降低,进而导致 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量减少。

本试验结果显示,淹水条件(模拟水田土壤)下,秸秆添加(CS)处理显著降低土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失,淹水后,土壤处于厌氧环境,减缓土壤硝化作用的进行,使无机氮在土壤中的停留时间更长,导致土壤渗滤液中无机氮含量减少;同时,秸秆添加后,土壤 pH 升高(pH=7.04),提高土壤的氨挥发以及反硝化过程,氮素损失途径以氨气与 N_2O 气体为主。生物炭添加(B)处理后,土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失显著降低,而对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失无影响,可能原因是生物炭添加后,其特有的孔隙结构对 NH_4^+ 具有较强的吸附交换能力,改变其在土壤中氮素的运移^[18];而结果显示生物炭添加土壤对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失影响不大,这与 Singh 等^[30] 研究结果一致。秸秆和生物炭配施(BCS)处理显著降低土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失,生物炭对氮素的固持能力是导致土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失的重要原因;同时,秸秆的添加导致土壤中氨

挥发及厌氧环境下反硝化过程 N_2O 气体排放^[31]。本研究发现,生物炭和秸秆添加土壤的水田土壤均会降低土壤无机氮的淋失。

4 结论

(1)75% WHC 下,秸秆添加(CS)显著增加土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 以及无机氮淋失;生物炭添加(B)并未引起土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和无机氮淋失;生物炭和秸秆同时添加(BCS)显著增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和无机氮总量的淋失,但降低土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失。淹水条件下,B、CS 和 BCS 处理均显著降低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和无机氮总量的淋失,同时 CS 处理显著降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失,B 和 BCS 处理对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失无显著影响。

(2)水分是影响土壤氮素淋失的重要因子。相比 75% WHC 条件,淹水后 CK 和 B 处理均增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失,CS 处理 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失降低; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失方面,75% WHC 显著高于淹水。无机氮淋失中,CK 和 B 处理淹水状态显著高于 75% WHC;CS 处理淹水状态显著低于 75% WHC。

(3)75% WHC 下,CS 处理引起的土壤氮淋失主要在于土壤孔隙的增加后,养分淋溶更强烈,而 BCS 处理中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失降低,说明生物炭对土壤硝态氮的固持能力更高。淹水导致的土壤氮素淋失降低,是因为厌氧环境降低土壤硝化速率,导致氮素以氨挥发及反硝化产生 N_2O 气体形式淋失。

参考文献:

- [1] Thompson R B, Martinez-Gaitan C, Gallardo M, et al. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(3):261-274.
- [2] 李卓瑞,韦高玲.不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J].*生态环境学报*,2016,25(2):333-338.
- [3] Lin B L, Sakoda A, Shibasaki R, et al. A modeling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilisation[J]. *Water Research*, 2001, 35(8):1961-1968.
- [4] 张敏,赵森,田玉华,等.太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J].*土壤*,2018,50(1):35-42.
- [5] 刘汝亮,张爱平,李友宏,等.生物炭对引黄灌区水稻产量和氮素淋失的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(2):208-212.
- [6] 张星,刘杏认,林国林,等.生物炭和秸秆对华北农田表层土壤矿质氮和 pH 值的影响[J].*中国农业气象*,2016,

- 37(2):131-142.
- [7] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and green waste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(6): 2282-2287.
- [8] 王典,张祥,姜存仓,等.生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 963-967.
- [9] 周志红,李心清,邢英,等.生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 278-284.
- [10] 崔思远,尹小刚,陈阜,等.耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 174-179.
- [11] 胡宏祥,汪玉芳,陈祝,等.秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 101-105.
- [12] 许晓光,李裕元,孟岑,等.亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 991-999.
- [13] 赵旭,蔡思源,邢光熹,等.热带亚热带酸性土壤硝化作用与氮淋溶特征[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 1-9.
- [14] 刘青丽,邹焱,李志宏,等.雨养烟叶种植田无机氮淋溶特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 141-148.
- [15] 潘凤娥,胡俊鹏,索龙,等.添加玉米秸秆及其生物质炭对砖红壤 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 396-402.
- [16] 张焱,索龙,潘凤娥,等.生物质炭对砖红壤性质与养分及硝化作用的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(1): 55-59.
- [17] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3版.北京:中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [18] 惠锦卓,张爱平,刘汝亮,等.添加生物炭对灌溉土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 156-161.
- [19] 黄剑,张庆忠,杜章留,等.施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(2): 232-239.
- [20] 蒋美佳,刘晓林,冯钰梅,等.有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 99-104.
- [21] Francisco A. Crop responses to nitrogen overfertilization: A review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 205: 79-83.
- [22] Zhang J B, Cai Z C, Müller C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant specific N preferences: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 488-501.
- [23] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等.不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 99-104.
- [24] 秦红灵,陈安磊,盛荣,等.稻田生态系统氧化亚氮(N_2O)排放微生物调控机制研究进展及展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 922-929.
- [25] Xia L L, Lam S K, Wolf B, et al. Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(12): 5919-5932.
- [26] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 410-416.
- [27] 胡锦涛,樊军,付威,等.不同管理措施对黄土塬区农田土壤水分调控和硝态氮淋溶累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 51-60.
- [28] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 113-119.
- [29] 杨放,李心清,邢英,等.生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 972-977.
- [30] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [31] Zhang J B, Zhu T B, Meng T Z, et al. Agricultural land use affects nitrate production and conservation in humid subtropical soils in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 107-114.

(上接第 192 页)

- [24] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 852-860.
- [25] 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,等.施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(12): 2423-2434.
- [26] 吴汉卿,张玉龙,张玉玲,等.土壤有机氮组分研究进展[J]. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1240-1246.
- [27] Rovira P, Ramón V. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach[J]. *Geoderma*, 2002, 107(1): 109-141.
- [28] 彭银燕,黄运湘,孙梅.长期施肥条件下水稻土有机氮组分及矿化特性研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 173-176, 181.