

沼液施用条件下水稻秧苗生长限制因子分析

张丽萍, 孙国峰, 王子臣, 宗焦, 周炜, 盛婧

引用本文:

张丽萍, 孙国峰, 王子臣, 等. 沼液施用条件下水稻秧苗生长限制因子分析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2537-2543.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 刘庆平, 闫立龙

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2528-2536 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1022>

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李焯, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371-2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子

梁启斌, 侯磊, 李能发, 陈鑫, 王克勤

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1585-1593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1324>

养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究

杨涵博, 罗艳丽, 赵迪, 赖睿特, 张克强, 梁军锋, 沈丰菊, 王风

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2363-2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0471>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张丽萍, 孙国峰, 王子臣, 等. 沼液施用条件下水稻秧苗生长限制因子分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2537–2543.

ZHANG L P, SUN G F, WANG Z C, et al. Analysis of rice seedling growth restriction factors under biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2537–2543.



开放科学 OSID

沼液施用条件下水稻秧苗生长限制因子分析

张丽萍, 孙国峰, 王子臣, 宗焦, 周炜, 盛婧*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部种养结合重点实验室, 南京 210014)

摘要:为提升稻田沼液施用条件下水稻秧苗生长的安全性, 设置5个不同浓度沼液处理, 对秧苗生长指标和土壤理化性状进行分析研究。结果表明, 过量沼液施用增加了土壤溶液中 NH_4^+-N 浓度和EC值, 导致秧苗生长受到抑制, 鲜质量和株高降低, 根系黄化率升高。土壤溶液 NH_4^+-N 浓度和EC值与秧苗鲜质量极显著负相关($P<0.01$)。土壤溶液中 NH_4^+-N 浓度在沼液低量施用后较为稳定, 超量施用后较为敏感, 可作为指示指标。土壤中 NH_4^+-N 浓度是限制秧苗生长的关键因子, 秧苗对土壤溶液中 NH_4^+-N 耐受的最大安全阈值为 $90.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对沼液-水混合液中 NH_4^+-N 的最大安全消纳阈值为 $314.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

关键词:沼液; 水稻秧苗; 铵态氮; 限制因子; 安全阈值

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2537-07 doi:10.11654/jaes.2021-1025

Analysis of rice seedling growth restriction factors under biogas slurry application

ZHANG Liping, SUN Guofeng, WANG Zichen, ZONG Jiao, ZHOU Wei, SHENG Jing*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Province Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Crops and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: To improve the safety of rice seedling growth under biogas slurry (BS) application in paddy fields, five different concentrations of BS treatments were set up to analyze and study the growth indicators of the seedlings and the physical and chemical properties of the soil. The results showed that excessive application of BS increased the NH_4^+-N concentration and electrical conductivity (EC) value of the soil solution, thereby resulting in the suppression of seedling growth, a decrease in fresh weight and plant height, and an increase in the root yellowing rate. The NH_4^+-N concentration and EC value of the soil solution were negatively correlated with the fresh weight of the seedlings ($P<0.01$). The concentration of NH_4^+-N in the soil solution was relatively stable after low-volume application of BS and more sensitive after over-application, which can be used as an indicator. The concentration of NH_4^+-N in the soil was a key factor that restricts the growth of seedlings. The maximum safety threshold of seedlings' tolerance to NH_4^+-N in the soil solution was $90.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the maximum safe absorption threshold of NH_4^+-N in the BS-water mixture was $314.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: biogas slurry; rice seedling; ammonium nitrogen; limiting factor; security threshold

随着我国畜禽养殖业的集约化和规模化发展, 畜禽粪污产生量迅速增加。据农业农村部统计测算, 全国每年畜禽粪便产生量约38亿t, 综合利用率只有

60%左右。畜禽养殖业所排放的总氮(TN)占农业源排放量的42%, 是农业面源污染的主要来源之一, 因此畜禽粪污的无害化处理和资源化利用是我国生态

收稿日期: 2021-09-06 录用日期: 2021-09-27

作者简介: 张丽萍(1983—), 女, 山东淄博人, 博士研究生, 副研究员, 从事农牧结合循环利用研究。E-mail: 179080671@qq.com

*通信作者: 盛婧 E-mail: nkysj@hotmail.com

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)2014); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800105)

Project supported: The Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund (CX(20)2014); The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800105)

文明建设的紧迫任务和重要内容^[1-4]。我国的沼液年产量已超过16亿t^[5-6],然而受制于种养剥离的现状,养殖场周边配套农田面积十分有限,生产过程中往往为消纳沼液而过度施用,造成水稻生长受抑制,如分蘖受限、结实率低等。目前国内外对沼液过量施用的安全风险研究主要集中在环境安全评价,如水环境风险、土壤重金属和抗生素累积^[7-9]等,对影响水稻生长的限制因子的研究尚未见报道。本文通过研究不同浓度沼液对水稻秧苗生长的影响,旨在明确沼液施用条件下水稻秧苗生长的主要限制因子和沼液施用浓度阈值,为提升稻田沼液施用条件下水稻秧苗生长的安全性和沼液的合理、精准施用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用沼液取自位于泰州市的江苏洋宇生态农业有限公司养殖猪场,沼液经黑膜发酵后进入贮存池贮存20 d后施用。沼液原液TN含量为630 mg·L⁻¹,TP含量为63 mg·L⁻¹,TK含量为316 mg·L⁻¹,其中NH₄⁺-N含量占TN的84%以上。试验用土壤取自江苏常州新北水稻土,土质为砂质壤土,土壤pH为6.45,有机质含量为29.1 g·kg⁻¹,全氮含量为1.16 g·kg⁻¹,速效磷含量为13.1 mg·kg⁻¹,速效钾含量为122.9 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

1.2.1 沼液浓度梯度试验

盆钵试验于2020年7月下旬在网室大棚内进行。盆钵直径30 cm,高30 cm,每个盆钵装土厚度20 cm,装土量为10 kg。依据水稻需N量,试验盆钵设置7个处理:CK、常规施化肥(F)、BS1、BS2、BS3、BS4和

BS5,具体施肥量如表1所示。水稻品种为南粳46,种子经消毒后育秧,取秧龄20 d、长势相近的壮苗移栽至盆钵,每盆3穴,每穴3株。每个盆钵灌溉量为7.7 L,灌溉水层高度为5 cm。

1.2.2 NH₄⁺-N与EC单因素试验

NH₄⁺-N和电导率两个单因素试验在实验室培养箱内进行。NH₄⁺-N溶液用氨水溶液配制,设置82、164、246、410、574 mg·L⁻¹ 5个浓度处理;EC溶液用分析纯KCl配制,设置2、3、4、5、6 mS·cm⁻¹ 5个梯度处理,不施肥和常规施化肥处理为对照。水稻种子经消毒后育秧,同样取秧龄20 d、长势相近的壮苗移栽至小盆钵。小盆钵直径11 cm,高13.5 cm,每个盆钵装土600 g,水层高度5 cm。人工气候箱培养参数为:光照12 h/28 ℃,黑暗12 h/22 ℃,光照强度350 μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.3 取样与测定

水稻移栽后,分别在灌溉后的0、1、3、5、7 d和10 d收集田面水和土壤溶液,测定氮素含量和EC值。第10 d采收秧苗,测定鲜质量、株高和根系黄化率等指标,每个处理4个重复。水稻秧苗收获后用滤纸拭干水分,称量鲜质量并测量株高;将水稻主根系大于1/2变为黄色的定义为黄色根系,记录每株水稻幼苗的黄色主根数,再调查每株幼苗总主根数,计算黄色根系的比例^[10]。TN和NH₄⁺-N采用连续流动分析仪(SAN++ System, SKALAR, Netherlands)测定。EC值使用精密电导率仪(DDS-307A,上海雷磁)测定。

1.4 数据处理

采用Excel 2016和SPSS 17.0进行数据整理统计分析和相关性分析,多重比较采用Duncan法,相关性分析采用Pearson法。采用Excel 2016做图。

2 结果与分析

2.1 秧苗生长指标

秧苗鲜质量、株高均呈现随着沼液浓度增加而降低的趋势(图1)。具体来看,等N量沼液替代化肥施用(BS1)对秧苗生长最有利,生物量较化肥(F)处理增加35.8%,BS2处理次之,生物量增加15.2%。BS3、BS4和BS5处理的秧苗生物量较F处理分别降低了9.64%、6.06%和35.5%,其中,BS5与F处理间生物量差异显著。沼液浓度对秧苗株高影响程度低于生物量,BS1处理的株高显著高于其他处理,较F处理提高了8.93%。而BS3、BS4和BS5处理秧苗株高较F处理均有不同程度降低,降幅达3.21%~15.7%,其中,BS4、BS5与F处理间株高差异显著。

表1 盆钵试验不同沼液处理施肥量(g)

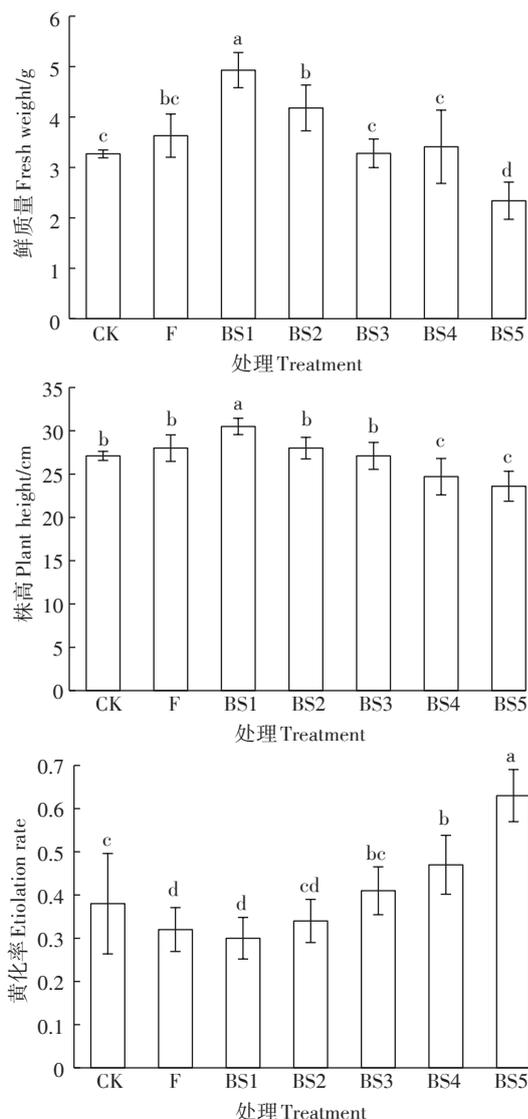
Table 1 Fertilization amount of different BS treatments in pot experiment(g)

处理 Treatment	N肥施用量 Nitrogen fertilizer amount	P肥添加量 Phosphorus addition amount	K肥添加量 Potassium addition amount	沼液混合比例 BS mix proportion/%
CK	0	0	0	—
F	0.924	0.462	0.462	—
BS1	0.924	0.370	0	23
BS2	1.700	0.292	0	42
BS3	2.500	0.212	0	61
BS4	3.290	0.133	0	81
BS5	4.090	0.053	0	100

秧苗根系黄化率与秧苗鲜质量、株高的规律相反,呈现随着沼液浓度增加而升高的趋势。具体来看,秧苗根系黄化率受沼液浓度影响较大,BS1、BS2处理秧苗根系黄化率与F处理间无显著性差异,其中BS1处理秧苗根系黄化率略低于F处理;而BS3、BS4和BS5处理根系黄化率均显著高于F处理,分别提高了28.1%、46.9%和96.9% ($P < 0.05$)。由此可见,高浓度沼液会对水稻秧苗生长产生明显的抑制作用。

2.2 田面水和土壤溶液中TN和NH₄-N浓度变化

沼液施用后会增加田面水的TN和NH₄-N含量,见图2。随着沼液施用量的增加,田面水的TN和



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1 不同浓度沼液对水稻秧苗生长的影响

Figure 1 Effects of different concentrations of BS on rice seedling growth

NH₄-N含量升高。随着施用时间延长,田面水的TN和NH₄-N含量均呈迅速下降的趋势。BS1到BS5的TN浓度从初始的72.7~497.0 mg·L⁻¹下降到10 d后的13.4~18.8 mg·L⁻¹,降幅达82%~96%; NH₄-N浓度从初始的49.9~391.0 mg·L⁻¹下降到10 d后的7.2~10.2 mg·L⁻¹,降幅达86%~97%。土壤溶液中的TN和NH₄-N也呈现下降趋势,但降速滞后于田面水。BS1到BS5的TN浓度降幅在54%~84%; NH₄-N浓度从初始的56.1~167.0 mg·L⁻¹下降到10 d后的16.2~93.8 mg·L⁻¹,降幅在44%~72%。并且沼液施用量越高,土壤溶液NH₄-N降幅越小。BS4与BS5处理降幅分别为59%和44%,施用沼液10 d后,土壤溶液NH₄-N仍保持在较高水平,分别为68.6、93.8 mg·L⁻¹。与沼液处理不同,化肥处理则在施用3 d后达到土壤溶液NH₄-N浓度峰值。

2.3 田面水和土壤溶液的EC值变化

图3表明,与不施肥处理相比,施用沼液后会增加田面水和土壤溶液EC值。沼液施用当天,田面水的EC值随着沼液施用量的增加而增加。随着施用时间延长,中高浓度沼液施用后田面水EC值呈现迅速下降的趋势。具体来看,除BS1外,BS2到BS5处理的田面水EC值均大幅下降,分别从初始的2.55~5.39 mS·cm⁻¹下降到施用后10 d的1.83~2.27 mS·cm⁻¹,降幅达28.2%~57.9%。土壤溶液EC值随着施用时间的延长则变化较小,低量沼液施用处理土壤溶液EC值呈现略有增加的趋势,而高量沼液施用处理土壤溶液EC值变化表现为缓慢下降趋势,BS2到BS5处理沼液施用当天的土壤溶液EC值分别为2.20~5.10 mS·cm⁻¹,施用10 d后EC值为3.03~4.01 mS·cm⁻¹。

2.4 秧苗鲜质量与NH₄-N等指标相关性分析

对不同浓度沼液处理土壤溶液和田面水中NH₄-N浓度、土壤溶液和田面水EC值与水稻秧苗鲜质量的相关性进行分析,见图4。由图4可知,秧苗鲜质量与土壤溶液和田面水NH₄-N浓度、土壤溶液和田面水EC值均呈显著负相关关系,达到1%极显著水平,其中土壤溶液NH₄-N浓度和土壤溶液EC值与秧苗鲜质量的相关系数分别为0.923 2和0.920 4。回归模拟分析表明,土壤溶液NH₄-N浓度对鲜质量影响的贡献度是14.24,土壤溶液EC值对鲜质量影响的贡献度是13.05,而田面水NH₄-N浓度和EC值对秧苗鲜质量影响的贡献度分别是9.09和9.41。由此推测,土壤溶液的NH₄-N和EC值是影响水稻秧苗生长的2个重要限制因子。

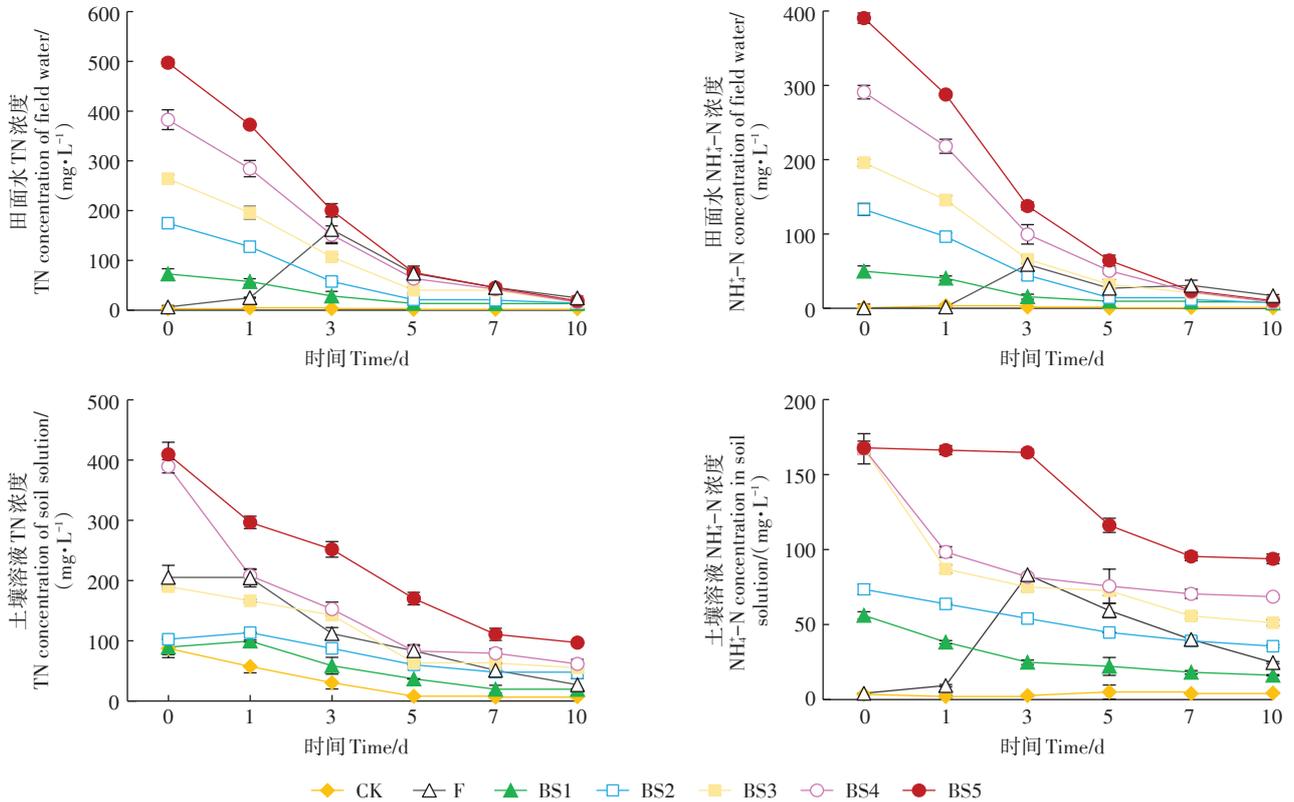


图2 水稻秧苗生长过程中田面水和土壤溶液中N素浓度变化

Figure 2 Changes of N concentration in field water and soil solution during rice seedling growth

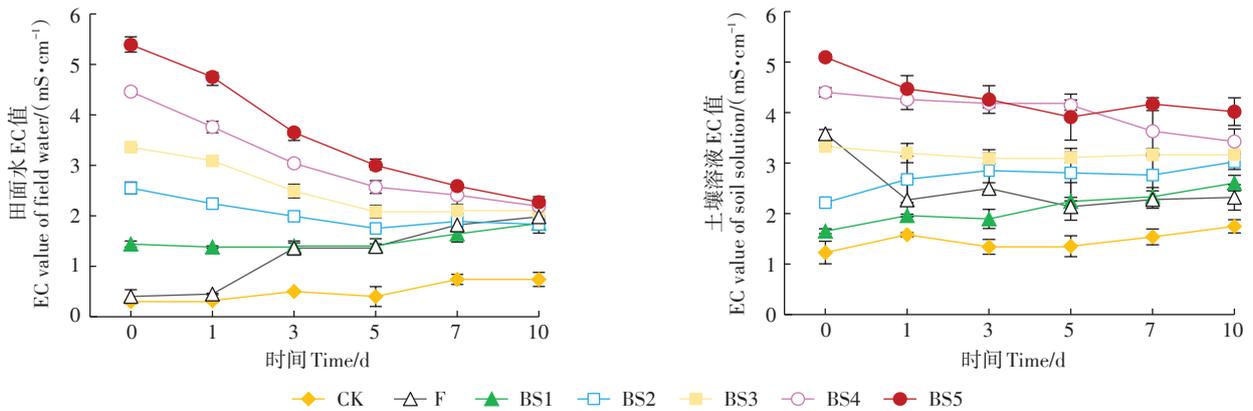
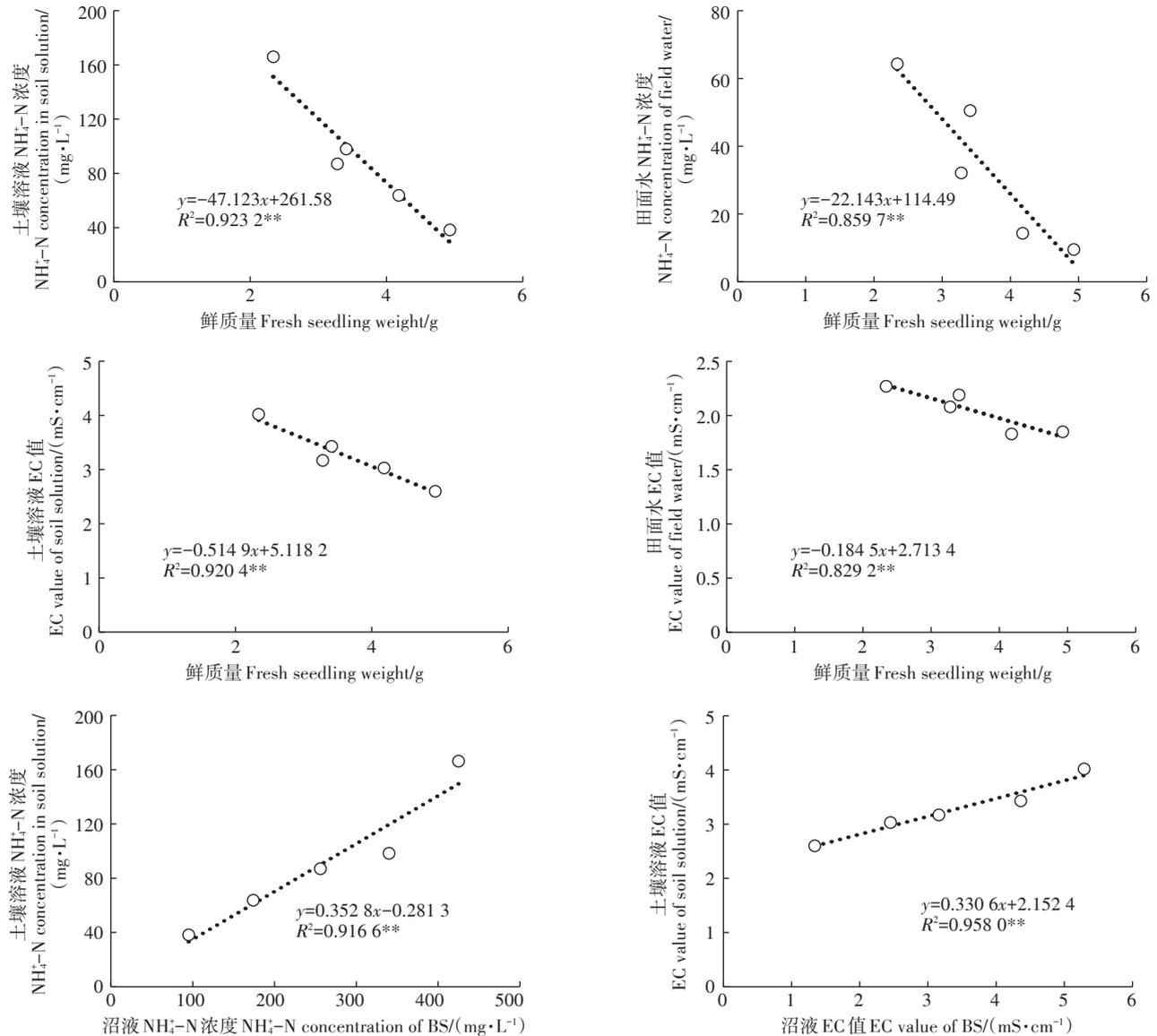


图3 水稻秧苗生长过程中田面水和土壤溶液EC值变化

Figure 3 Changes of EC value in field water and soil solution during rice seedling growth

秧苗鲜质量与土壤溶液中 NH₄⁺-N 浓度可用 $y = -47.123x + 261.58$ ($n=5, R^2=0.9232$) 方程来拟合, 以常规施肥秧苗鲜质量为参照, 拟合结果表明, 水稻秧苗对土壤溶液中 NH₄⁺-N 的最大安全消纳量为 90.8 mg·L⁻¹。同时, 土壤溶液 NH₄⁺-N 浓度与施用的沼液 NH₄⁺-N 浓度呈现显著正相关关系, 可用 $y = 0.3528x - 0.2813$ ($n=5, R^2=0.9166$) 方程来拟合, 由此拟合结果推测, 水稻秧苗对沼液 NH₄⁺-N 的最大安全消纳阈值为 314.0 mg·L⁻¹。

秧苗鲜质量与土壤溶液 EC 值可用 $y = -0.5149x + 5.1182$ ($n=5, R^2=0.9204$) 方程来拟合, 以常规施肥秧苗鲜质量为参照, 拟合结果表明, 水稻秧苗对土壤溶液 EC 值的最大耐受值为 3.2 mS·cm⁻¹, 与联合国粮农组织公布的数据相近。同时, 土壤溶液 EC 值与施用的沼液 EC 值也呈现显著正相关关系, 可用 $y = 0.3306x + 2.1524$ ($n=5, R^2=0.9580$) 方程来拟合, 由此拟合结果推测, 水稻秧苗对沼液 EC 值的最大安全耐受阈值为



*表示相关性显著($P < 0.05$), **表示相关性极显著($P < 0.01$)。下同

* indicates significant correlation ($P < 0.05$). ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$). The same below

图4 秧苗鲜质量与各因素相关性分析

Figure 4 Correlation analysis between fresh weight of rice seedlings and various factors

3.3 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2.5 秧苗生长主要限制因子分析

NH_4^+-N 浓度和EC值单因素试验的相关性分析表明,秧苗鲜质量与沼液施用下土壤溶液 NH_4^+-N 浓度呈负相关关系(图5)。将沼液施用下水稻秧苗对土壤溶液中 NH_4^+-N 的最大安全消纳量 $90.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 代入 $y = -0.0089x + 2.3215$ ($n=5, R^2=0.9520$)方程拟合,在此消纳量下可获得秧苗鲜质量为 1.51 g ,与常规施化肥处理秧苗鲜质量相比,降幅达 30.9% 。同样,将沼液施用下水稻秧苗对土壤溶液中EC值的最大安全耐受阈值 $3.2 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 带入 $y = -0.1744x + 2.7424$ ($n=5, R^2=$

0.9243)方程拟合,在此耐受阈值下可获得秧苗鲜质量为 2.18 g ,与常规施化肥处理鲜质量相比,降幅仅为 2.68% 。分析结果表明,水稻秧苗生长对土壤溶液 NH_4^+-N 浓度更敏感,因此,沼液施用后土壤溶液中 NH_4^+-N 为限制秧苗生长的关键因子。

3 讨论

3.1 影响水稻生长的限制因子

水稻的生长发育受土壤肥力水平、离子浓度和有机质等影响,而沼液富含 NH_4^+-N 、盐分和COD。研究表明,沼液的安全风险与其物化特性如高浓度 NH_4^+-N 、

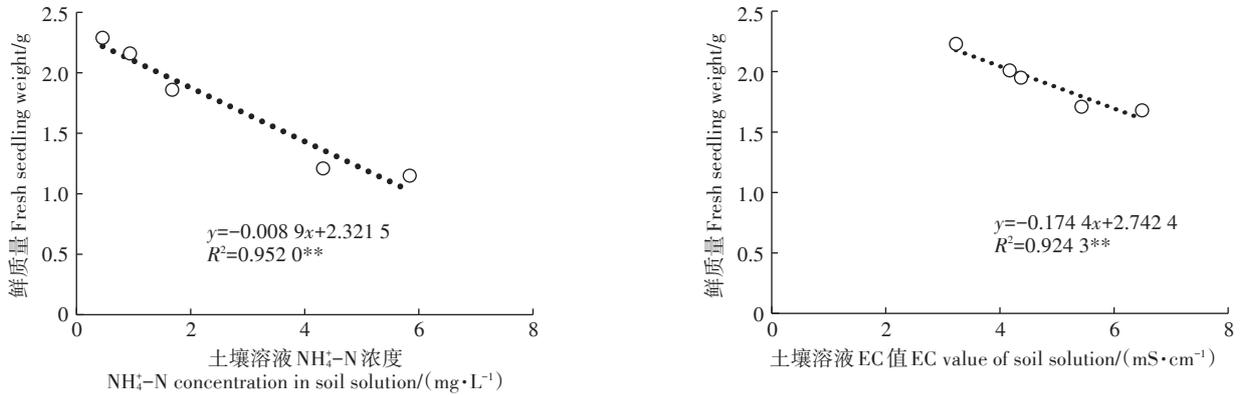


图5 单因素土壤溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 EC 值对秧苗鲜质量的影响

Figure 5 Effects of single factor of soil solution $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and EC on fresh weight of rice seedlings

EC 值和 COD 等指标有关^[11-12]。由于沼液贮存时处于好氧状态, COD 降解速度快, 对作物生长的影响并不明显。沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的占比超过 70%^[13], 是水稻吸收利用氮素的主要形式, 因此沼液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是影响水稻生长的一个重要因素, 但目前缺乏其对水稻生长影响程度的研究。本研究通过研究不同浓度沼液施用下水稻秧苗生长状况, 发现沼液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超过 $314.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著抑制秧苗生长。另一方面, 沼液的 EC 值最高达 $13.9 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (平均为 $7.76 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), 超过作物生长正常电导率范围, 存在盐害风险^[14]。TIGINI 等^[12]通过研究沼液对 7 个不同物种的生态毒性发现, 不同物种对高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和高电导率存在不同程度的敏感性, 但最终仅对沼液的生态毒性进行了综合性评价, 并未明确关键毒性因素。本研究发现, 沼液施用增加了土壤溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 EC 值, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超过 $98.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 秧苗生长受到显著抑制, 此时与之相对应的土壤溶液 EC 值为 $3.43 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 与联合国粮农组织公布的水稻正常生长土壤溶液 EC 值 $3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 十分接近, 单因素试验进一步验证, 水稻秧苗对沼液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度更加敏感。因此, 沼液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是影响水稻生长的关键限制因子。本研究还发现沼液的 EC 值随沼液浓度的增加而升高, 因此 EC 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是否存在协同作用仍需进一步深入研究。

3.2 沼液安全施用阈值

已有的研究表明, 水稻在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的专一营养下会产生中毒的现象, 过量施用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 会造成水稻根际酸化, 进而对细胞造成损伤^[15], 因此合理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 施用安全阈值是一个亟待研究的科学问题^[16-17]。丁明^[18]用含不同浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的国际水稻研究所 (IRRI) 化学营养液培养水稻幼苗, 结果表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超

过 $144 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时幼苗受到显著抑制, 不能正常生长。本研究明确水稻秧苗对沼液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大耐受安全阈值是 $314.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 单因素试验中氨水浓度超过 $410.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时秧苗不再生长, 阈值浓度均高于化肥 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水培液的浓度, 这是因为土壤具有缓冲作用。已有研究表明, 土壤对 NH_4^+ 的吸附量达到吸附平衡时, 吸附率可达 60%^[19], 土壤是高浓度沼液施用的一个很好的缓冲系统, 有助于沼液的高量消纳。同时, 本研究发现与化肥相比, 等氮量沼液施用后能够促进水稻秧苗的生长。沼液中除了氮素养分外, 富含多种微量元素和生长激素等有益物质^[20], 这些物质是否与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 存在协同作用共同促进水稻生长是一个值得关注的研究方向。

4 结论

(1) 过量施用沼液会增加田面水和土壤溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 EC 值, 进而对水稻秧苗生长产生明显的抑制作用, 具体表现为秧苗鲜质量和株高随沼液浓度增加而降低, 根系黄化率随沼液浓度增加而升高。

(2) 沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 EC 值与秧苗生长的关联度较大, 沼液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为限制秧苗生长的关键因子。土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在沼液低量施用后较为稳定, 超量施用后较为敏感, 更适合作为指示指标。

(3) 在本研究土壤条件下, 水稻秧苗对土壤溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大安全消纳阈值为 $90.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 对沼-水混合液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大消纳阈值为 $314.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 石吕, 刘建, 魏亚凤, 等. 沼液在农业领域的资源化利用现状[J]. 中国农学通报, 2019, 35(35): 109-117. SHI L, LIU J, WEI Y F, et al.

- Current status of resource utilization of biogas slurry in agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(35):109-117.
- [2] 蔡文炳. 规模化猪场粪污处理模式的比较分析[D]. 南京:南京农业大学, 2015. CAI W B. Comparative analysis on different waste treatment modes in scale pig farms[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [3] 王梅. 养猪场粪便沼液利用效果评价[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018. WANG M. Evaluation of biogas slurry utilization efficiency in pig farm[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [4] 朱凤香, 王卫平, 陈晓昉, 等. 利用人工湿地栽种水生作物对沼液进行无害化消解[J]. *浙江农业学报*, 2011, 23(2):364-368. ZHU F X, WANG W P, CHEN X Y, et al. Preliminary study on harmless digestion of biogas slurry by using aquatic plants grown on artificial wetland [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(2):364-368.
- [5] NASIR I M, MOHD GHAZI T I, OMAR R. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3):258-269.
- [6] KE L, LIU X, DU B, et al. Component analysis and risk assessment of biogas slurry from biogas plants[J/OL]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.05.039>.
- [7] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(1):117-124. XUE L H, YANG L Z. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake Region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1):117-124.
- [8] 刘结友, 曲亮. 基于全混合厌氧反应器厌氧发酵猪粪产生沼液的环境影响分析[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(11):127-134. LIU J Y, QU L. Environmental impact analysis of biogas slurry generated by pig manure anaerobic treatment based on CSTR[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(11):127-134.
- [9] 汤逸帆, 汪玲玉, 吴旦, 等. 农田施用沼液的重金属污染评价及承载力估算——以江苏滨海稻麦轮作田为例[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4):1687-1695. TANG Y F, WANG L Y, WU D, et al. Assessment of heavy metal pollution and bearing capacity estimation of continuous biogas slurry application on cropland: A case study of the coastal rice-wheat rotated farmland in Jiangsu, China[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4):1687-1695.
- [10] 刘晓龙. 脱落酸(ABA)对水稻耐碱胁迫的诱抗效应及机理研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019. LIU X L. Studies on the mechanism of abscisic acid-priming for alkaline stress tolerance in rice[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [11] BAUDER T A, WASKOM R M, SUTHERLAND P L, et al. Irrigation water quality criteria[D]. Colorado: Colorado State University, 2011.
- [12] TIGINI V, FRANCHINO M, BONA F, et al. Is digestate safe? A study on its ecotoxicity and environmental risk on a pig manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551/552:127-132.
- [13] 李松林. 大量施灌沼液稻田氮素动态特征及其对环境的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2011. LI S L. Nitrogen dynamics in paddy field after irrigation of biogas slurry and its impact on the environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [14] 王小彬, 闫湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1):110-139. WANG X B, YAN X, LI X Y. Environmental safety risk for application of anaerobic fermentation biogas slurry from livestock manure in agricultural land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1):110-139.
- [15] 马晓玲. γ -氨基丁酸(GABA)缓解水稻铵毒害现象及机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014. MA X L. γ -Aminobutyric acid(gaba) alleviates ammonium toxicity and their mechanisms in rice seedlings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [16] MAAS E V. Crop salt tolerance[M]/TANJI K K. Agricultural salinity assessment and management. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, New York: American Society of Civil Engineers, 1990:262-304.
- [17] JOSKA G, ZHU Z J, ROY B, et al. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1997, 160:239-251.
- [18] 丁明. 铵态氮营养下水稻根系质子泵的作用机制[D]. 南京:南京农业大学, 2019. DING M. Involvement of plasma membrane H^+ -ATPase of rice roots in the ammonium-nutrition[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [19] 孙大志. 氨氮在土壤中吸附/解吸的动力学与热力学研究[J]. *北华大学学报:自然科学版*, 2007, 8(6):493-496. SUN D Z. Ammonia absorption/ desorption behavior and thermodynamics in soil[J]. *Journal of Beihua University(Natural Science)*, 2007, 8(6):493-496.
- [20] 韩敏, 刘克锋, 王顺利, 等. 沼液的概念, 成分和再利用途径及风险[J]. *农学学报*, 2014, 4(10):54-57. HAN M, LIU K F, WANG S L, et al. Definition, ingredient, approaches and risks for reuse in biogas slurry[J]. *Journal of Agriculture*, 2014, 4(10):54-57.