

基于风险因子评价的沼液对小麦安全利用阈值研究

胡小山¹, 孟登辉², 彭 轮¹, 丁 健^{1*}, 余天雨¹, 孟留洋²,

周文宁², 童佳峰¹, 刘明月², 闫丙建¹, 刘 龙¹

(1. 河南牧原生态环境科技有限公司, 河南 南阳 473000; 2. 牧原食品股份有限公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 建立沼液安全施用研究方法, 探究沼液在不同酸度的土壤中对小麦作物的安全施用阈值, 为沼液安全利用提供依据。分析沼液成分, 通过室内盆栽试验和田间试验确定对小麦生长产生抑制作用的组分, 进而确定各成分最高浓度。结果说明: 1) 挥发性脂肪酸(VFAs)在酸性土壤、无机离子在碱性土壤对小麦生长的抑制作用更为明显; 2) VFAs 主要以分子形式抑制小麦生长, VFAs 在小麦分蘖期比越冬期更明显抑制小麦生长, 温度高促进 VFAs 水解为分子; 3) 由于碱性土具有更强的保盐能力, 小麦生长易受无机离子影响; 4) 无机离子主要成分为氮、磷、钾, 按照测土配方施用不影响小麦生长。沼液施用于酸性土壤需控制 VFAs 浓度, pH 值 7.5 的土壤沼液播后底肥、分蘖期至苗期、分蘖后期、越冬期、返青拔节期追肥的 VFAs 浓度分别不超过 45 mmol·L⁻¹、11 mmol·L⁻¹、23 mmol·L⁻¹、30 mmol·L⁻¹、18 mmol·L⁻¹, 且土壤 pH 值越低, VFAs 安全浓度越低。

关键词: 沼液; 猪粪; 挥发性脂肪酸; 无机离子; 小麦

中图分类号: S216.4; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2024)01-0060-10

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.20230910

Esearch on the Application of Liquid Digestate for Wheat Based on Risk Factor Evaluation / HU Xiaoshan¹, MENG Denghui², PENG Lun¹, DING Jian^{1*}, YU Tianyu¹, MENG Liuyang², ZHOU Wenning², TONG Jiafeng¹, LIU Mingyue², YAN Bingjian¹, LIU Long¹ / (1. Henan Muyuan Ecological Environmental Technology Co Ltd, Nanyang 473000, China; 2. Muyuan Foods Co Ltd, Nanyang 473000, China)

Abstract: Establish a research method for the safe application of liquid digestate and investigate the safety threshold criteria for the application on wheat crops in soils with different acidity, thus maximize the utilization. The components of liquid digestate were analyzed to target those that inhibit the growth of wheat through following pot and filed trails. Then the maximum concentration of each risk factor was determined. 1) Volatile fatty acids (VFAs) inhibit the growth of wheat more significantly in acidic soils, while the inhibition effect was stronger in alkaline soils by inorganic ions. 2) The inhibition of VFAs on wheat shows more severely at the tillering stage than overwintering stage due to high temperatures promoting the hydrolysis of acidic ions into molecules. 3) The growth of wheat was stronger inhibited by inorganic ion in alkaline soils due to the greater salt retention capacity. 4) The inhibition will be avoided when the liquid digestate is applied according to the nutrient demand testing logic, due to the main species of inorganic ions are nitrogen, phosphorus and potassium. VFAs have restricted concentration when the liquid digestate acts as fertilizer. In detail, for the soil of pH 7.5, the restricted concentration of VFAs during different growth period of rice is respectively 45 mmol·L⁻¹, 11 mmol·L⁻¹, 23 mmol·L⁻¹, 30 mmol·L⁻¹, 18 mmol·L⁻¹ for post-sowing stage, tillering to seedling stage, late tillering stage, overwintering stage and greening stage. Besides, the threshold concentration of VFAs becomes lower along with the pH value of soil.

Key words: biogas slurry; pig manure; volatile fatty acids; inorganic ions; wheat

我国畜牧业综合生产能力显著提升, 畜禽养殖业向集约化、规模化的方向迅速发展^[1-4], 直接导致了猪粪的集中排放, 造成环境污染。沼气发酵是猪

粪资源化利用的重要途径: 猪粪厌氧发酵产生沼气和沼液, 沼液富含有机物和营养成分, 可作为有机肥施用^[5-10]。本研究建立沼液安全利用阈值的研究

收稿日期: 2023-04-06 修回日期: 2023-07-26

作者简介: 胡小山(1989-), 男, 汉族, 安徽省安庆市人, 中级环保工程师, 主要从事生猪养殖畜禽粪污资源化利用、沼气提纯利用、种养循环模式建立等方面的工作, E-mail: huxiaoshan@muyuanfoods.com

通信作者: 丁 健, E-mail: dingjian@muyuanfoods.com

方法,确定沼液对小麦农用的安全阈值标准,以规避过量或不当施用而带来的环境及健康风险,为猪场沼液的安全利用提供依据。沼液在小麦作物的应用首先是防治病虫害。1989年,郑开红^[11]在实际农业活动中首次发现沼液具有防治小麦蚜虫的作用,杀虫率90%以上;随后,时振山^[12]以小麦赤霉病为研究目标,明确了沼液与多菌灵对小麦赤霉病的防治作用为一致水平。后来研究表明沼液除防治小麦病虫害以外,对小麦还具有增产作用:叶面喷施沼液能使小麦比喷施磷酸二氢钾增产3.48%^[13];用沼液浸种小麦能够使其产量比用清水浸种提高7%^[14]。此后诸多研究重点为探究沼液对小麦作物最佳施用量。以沼液作基肥75 t·hm⁻²、追肥37.5 t·hm⁻²使小麦产量最高^[15],比不施沼液处理增加12.26%^[16]。此外,邵文奇^[17]通过对比不同沼液施用量下小麦的气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率等光合特性发现,沼液用量在450~600 t·hm⁻²时小麦的光合特性处于较优水平,且在600 t·hm⁻²沼液用量下产量提高8.1%~8.9%,然而超过该施用量时小麦产量和品质明显降低。合理施用沼液是资源利用效率最大化的前提。上述研究探讨了以沼液的施用方法和施用量。然而沼液性质成分随发酵原料和发酵工艺等因素变化,施用总量控制的条件下仍可能造成作物生长抑制、环境污染等问题,这是由于沼液中致害成分的浓度过高,以及作物在不同酸碱度土壤中对沼液耐受性不同所导致。因此,仅规定用量无法规避风险,应建立以沼液风险因子安全阈值为核心的利用标准,根据土壤酸碱度进行标准细分。为填补此欠缺而启动本项研究。以小麦作物为研究对象,建立沼液安全利用阈值探究方法,确定沼液成分中抑制作物生长的风险因子及其在不同酸碱度土壤中的安全浓度阈值。将沼液施用标准的核心由施用量转变为风险因子安全浓度阈值,精细化制定不同性质沼液在不同酸碱度土壤中的利用标准,为仅依赖沼液施用量可能带来农用风险问题的解决提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验时间、地点

本研究田间试验于2021年11月~2022年5月,分别在农业试验基地A(非碱性土)、试验基地B(碱性土)进行。室内盆栽试验于2021年7月在某检测技术公司提供的温室进行。

1.2 试验材料

1.2.1 供试材料

供试小麦品种百农4199,沼液取自取自某规模化生猪养殖有限公司。室内盆栽试验土壤取自农业试验基地A、B取耕层土壤(深度0~20 cm),去除砂石和秸秆后自然晾干、过筛处理备用。

1.2.2 取样方法

土壤性质供试样品:样品通过五点法取样,从每个试验基地抽取1 kg土壤样品,去除砂石和秸秆、自然晾干后待测。

沼液样品:取自规模化生猪养殖有限公司各猪场环保区厌氧发酵出水口,共计6651个样品。

田间统计:作物长势情况统计采用五点法进行追踪,每个追踪位点采用“一米双行”的方式计算植株异常率和叶片受损率,从而确定作物受影响等级。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

室内盆栽试验:盆体口径20 cm、深15 cm,每盆装土2.5 kg,播种量每盆50株,各处理沼液浇灌量按水土质量比1:4计算。每个处理进行3次重复,试验过程中严格把控变量为单一因素。田间试验:试验小区规划为长5 m宽2 m,行距为20 cm,播种量每亩12.5 kg,沼液浇灌量为450 m³·hm⁻²。

1.3.2 作物影响等级评价方法

以植株异常率和叶片受损率为核心参数,创新性建立六级作物影响评价标准(见表1),用于对比各风险因子对作物的影响程度。该评价体系实际操作性强,通过观察植株生长表观性状反映受影响程度,操作性强,样本数量大。

表1 六级作物影响指标

影响等级	影响指标
0	植株无异常,叶片无受损
1	植株异常率/叶片受损率5%~10%
2	植株异常率/叶片受损率10%~20%
3	植株异常率/叶片受损率20%~50%
4	植株异常率/叶片受损率50%~80%
5	植株死亡

1.3.3 配置溶液规格

配置挥发性脂肪酸混合酸,用于模拟沼液中的酸根离子,各组成如表2所示。

表2 混合酸组成及占比

组分	物质的量占比	浓度
	%	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
乙酸	34.94	20.964
丙酸	28.3	20.942
丁酸	23.8	20.944
戊酸	4.11	4.1922
异丁酸	4.74	4.1712
异戊酸	4.11	4.192
混合酸	100.00	75.405

配置混合无机离子溶液,用于模拟沼液中的无机离子,各组成如表3所示。

表3 混合无机离子溶液组成及占比

组分	物质的量占比	浓度
	%	($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
铵根离子 NH_4^+	54.72	4389
钠离子 Na^+	12.85	926
钾离子 K^+	12.63	959
钙离子 Ca^{2+}	2.46	278
镁离子 Mg^{2+}	2.46	238
铁离子 Fe^{3+}	0.09	15
混合无机离子	100.00	7240

1.3.4 测试方法

表4 室内试验土壤性质

试验地	pH 值	电导率	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	全盐量
		($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
A	5.0	119.7	20.4	1.29	0.132	0.0416	0.292	0.4
B	8.5	1113.64	35.7	1.81	0.14	0.0105	0.142	1.1

表5 田间试验土壤性质

试验地	pH 值	电导率	有机质	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	全盐量
		($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
A	5.0	318.5	32.2	1.90	0.286	0.058	0.276	1.5
B	8.5	158.7	27.1	1.27	0.120	0.0113	0.208	0.5

2.2 沼液成分分析

对沼液的物理化学性质进行分析,结果显示沼液呈中性(pH 值 7.4),成分主要为无机离子以及挥发性脂肪酸(见图 1A)。无机成分中,总氮浓度区间主要为 500 ~ 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 36.45%)、总磷

土壤进行风干、磨细和过筛后,分别进行指标测试。土壤 pH 值采用悬浊液 pH 测定法;土壤全氮采用消煮、硼酸吸收后滴定的方式测定;碱解氮采用标准酸滴定法计算测定;有效磷采用紫外/可见分光光度计法测定;速效钾使用火焰光度计法测定;全盐量使用称重法根据差值确定。

沼液性质指标按照以下方法测定:沼液氨氮采用纳式试剂分光光度法进行;沼液总氮经过碱性过硫酸钾消解后通过紫外分光光度法测定并计算得到;沼液总磷按照钼酸铵分光光度法进行;沼液总钾、钠离子、铁离子按照火焰原子吸收分光光度法进行;沼液钙离子、镁离子采用原子吸收分光光度法进行;沼液中氯离子及硫酸根离子使用离子色谱法检测,挥发性脂肪酸使用液相色谱检测,沼液 pH 值使用玻璃电极法进行测定。

1.3.5 统计分析

数据使用 Microsoft Excel 2019 进行整理,使用 GraphPad Prism 对数据进行统计分析和图表制作。

2 结果与分析

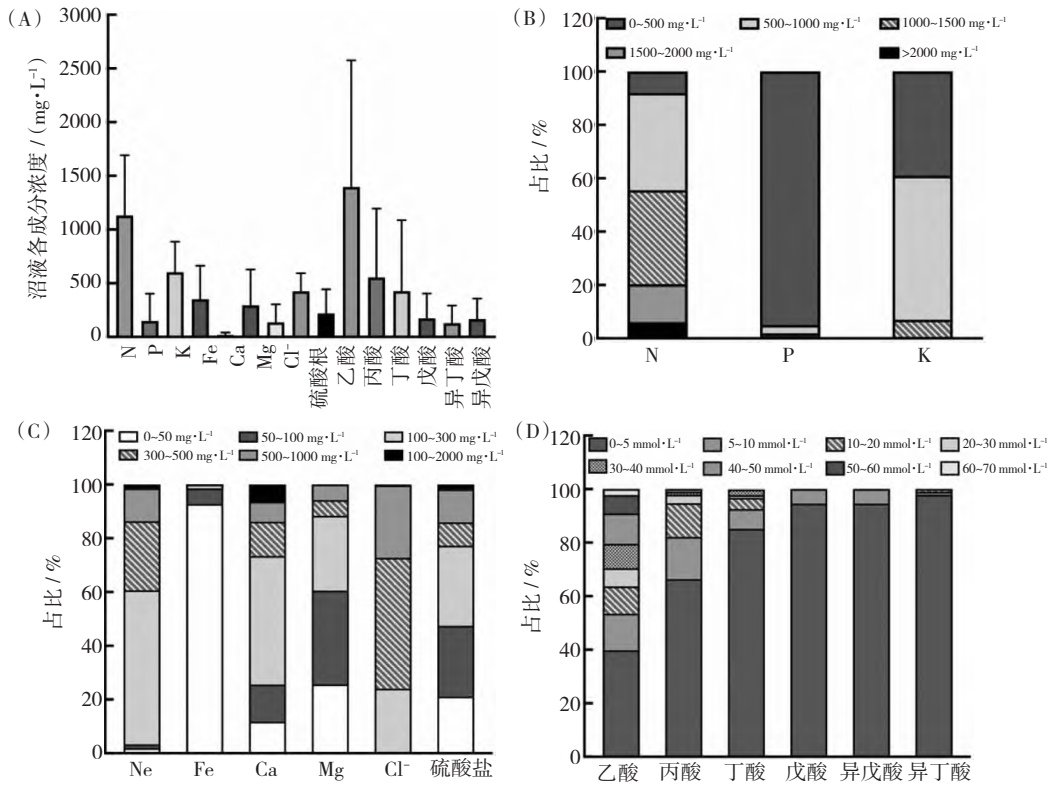
2.1 土壤性质

室内盆栽试验及田间试验土壤理化性质分别为表4、表5所示,试验基地 A、B 土壤 pH 值分别为 5.0 及 8.5,土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾等均处于较为一致的水平。

浓度区间主要为 0 ~ 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 95.01%)、总钾浓度区间主要为 500 ~ 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 53.96%);钠离子浓度区间主要为 100 ~ 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 57.31%);铁离子浓度区间主要为 0 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 92.75%);钙离子浓度区间主要为 100 ~ 300

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 47.87%); 镁离子浓度区间主要为 $50\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 34.88%); 氯离子浓度区间主要为 $300\sim 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 48.68%); 硫酸盐浓度区间主要为 $100\sim 300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (占比 29.82%)。挥发性脂肪酸占比最大的浓度区间为 $0\sim 5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 各

占比分别为乙酸 39.77%、丙酸 66.32%、丁酸 85.11%、戊酸 94.57%、异戊酸 94.57%、异戊酸 97.83% (见图 1D)。本研究选取挥发性脂肪酸和无机离子作为待研究的风险因子, 通过室内盆栽试验和田间试验对其风险性进行分析。



注: (A) 沼液各组分平均浓度; (B) 养分各浓度占比; (C) 无机离子各浓度占比; (D) 挥发性脂肪酸各浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 占比
图 1 沼液成分及浓度区间占比

2.3 室内盆栽试验

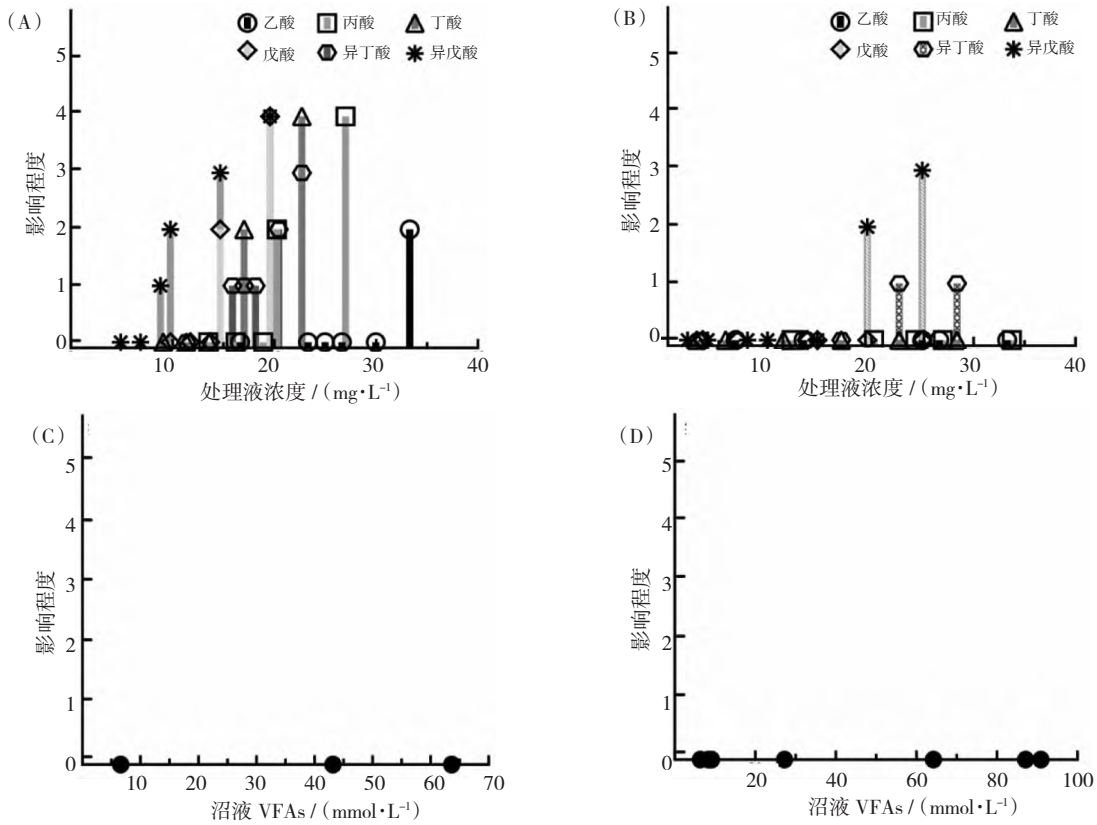
2.3.1 挥发性脂肪酸

挥发性脂肪酸对小麦影响的盆栽试验结果如图 2 所示, 其中, VFAs 在非碱性土壤 (pH 值 5.0) 中对小麦的影响程度 (见图 2A) 比在碱性土壤 (pH 值 8.5) 中的影响程度 (见图 2B) 更为明显, 具体现象为: 1) 在非碱性土壤 (pH 值 5.0) 中, 酸浓度为 $8.8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 即对小麦产生 1 级影响, 而碱性土对应的浓度为 $17\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 是非碱性土壤安全浓度的 2.2 倍; 2) 在相同的浓度范围 ($0\sim 35\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 内, 挥发性脂肪酸在 pH 值 5.0 土壤中对小麦的最大影响为 4 级, 在 pH 值 8.5 土壤中为 3 级; 3) 浓度范围相同时, 在 pH 值 5.0 土壤中各挥发性脂肪酸均对小麦产生 ≥ 2 级影响, 而在 pH 值 8.5 土壤中仅有长碳链的异丁酸和异戊酸表现出对小麦生长的抑制作用。

此外, 在相同浓度区间内 ($0\sim 40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), 配置溶液 (见图 2A、B) 对作物的抑制程度更大这是由于配置溶液和实际沼液的 VFAs 存在形式差异: 配置溶液经过酸化处理, VFAs 大部分以分子形式存在, 产生明显的小麦生长抑制作用; 实际沼液 pH 值呈中性, 此时 VFAs 大部分以酸根离子形式存在, 对小麦基本无抑制作用。

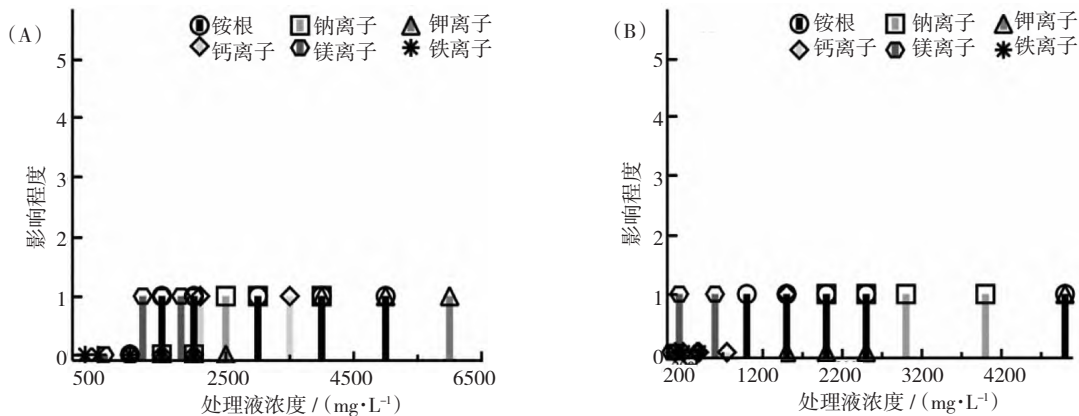
2.3.2 无机离子

以 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 为研究对象, 设置不同浓度梯度探究各组分对小麦的影响 (见图 3)。无机离子在 pH 值 5.0 和 pH 值 8.5 土壤中均对小麦产生抑制作用, 最高影响程度为 1 级, 但在 pH 值 8.5 土壤中对小麦的影响作用更强: Mg^{2+} 对小麦产生 1 级影响时的浓度, 在 pH 值 8.5 土壤中为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而在 pH 值 5.0 土壤中为 $1200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。



注: (A) 盆栽土壤 pH 值 5.0; (B) 盆栽土壤 pH 值 8.5; (C) 实际沼液施加至 pH 值 5.0 土壤的盆栽实验; (D) 实际沼液施加至 pH 值 8.5 土壤的盆栽实验。

图 2 挥发性脂肪酸对小麦影响的盆栽试验



注: (A) 盆栽土壤 pH 值 5.0; (B) 盆栽土壤 pH 值 8.5。

图 3 无机离子对小麦影响的盆栽试验

结合无机离子在土壤中对作物的影响机理可知,植物根系吸收水分的动力是根系细胞的高渗透压,当土壤胶体吸附过量无机离子时,土壤渗透压增高导致根系细胞无法从土壤吸收水分和养分。碱性土壤和非碱性土壤胶体对无机离子的吸附能力不同,导致在相同的施用量和浓度下,碱性土耕层保留

的无机离子浓度更高,因此应在后续的大田试验中探究不同土壤对无机离子的留存能力以及对作物的影响,避免因无机离子过高导致作物生长抑制。

2.4 大田试验

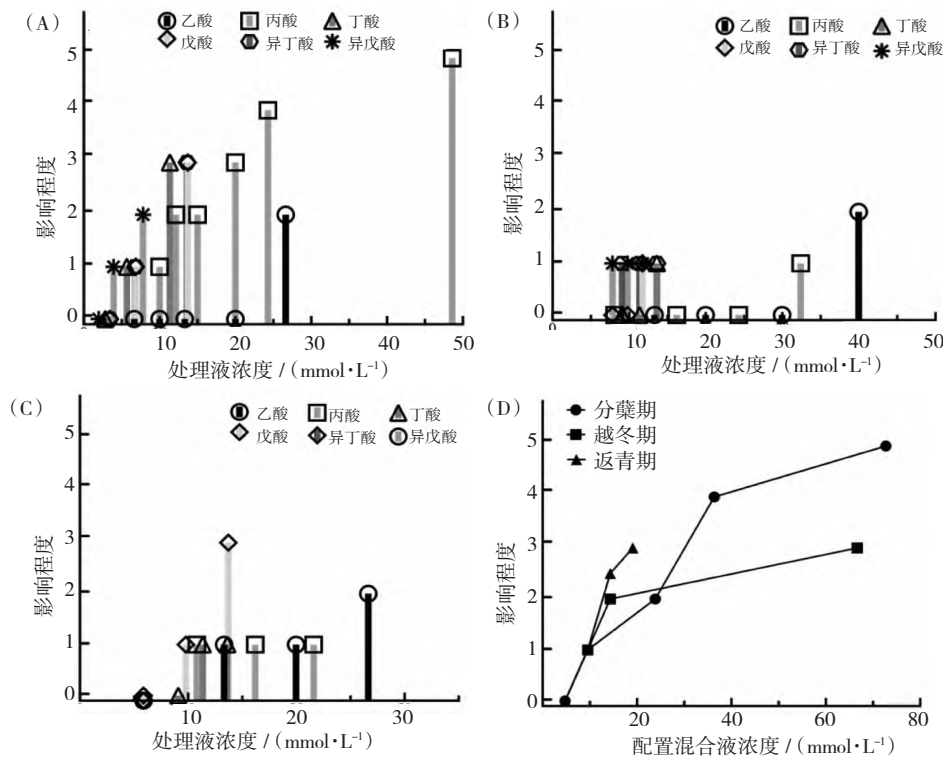
根据盆栽试验结论,分别在农业试验基地 A (pH 值 5.0) 和农业试验基地 B (pH 值 8.5) 进行大

田试验,探究非碱性土壤和碱性土壤对风险因子的承载能力。

2.4.1 挥发性脂肪酸

沼液 VFAs 对非碱性土壤 (pH 值 5.0) 的小麦生长影响作用如图 4。小麦分蘖期,各类挥发性脂肪酸均对小麦生长产生影响,且最大影响程度为 5 级。此外,乙酸、丙酸、异戊酸产生 2 级影响的浓度分别为 $26.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $12.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $7.83 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,表明碳链越长的挥发性脂肪酸对作物的抑制程度越高(见图 4A);小麦越冬期,各类酸对小麦产生 1 级影响的浓度分别为丙酸 $32.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、丁酸 $13.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、戊酸 $11.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、异丁酸 $9.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、异戊酸 $7.83 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,证实

了长碳链 VFAs 对作物更明显的抑制作用(见图 4B);小麦拔节期,当浓度为 $13.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,乙酸、丁酸、戊酸对小麦的影响程度分别为 1、1、3 级,长碳链挥发性脂肪酸对小麦的作用规律与分蘖期、越冬期一致(见图 4C)。此外,混合酸对不同时期作物的影响结果表明:1) 混合酸在非碱性土壤中对分蘖期的影响明显高于越冬期,这是因为小麦分蘖期温度比越冬期高,VFAs 对根系细胞的影响加剧,从而表现出更明显的小麦生长抑制作用;2) 在 pH 值 5.0 土壤中,挥发性脂肪酸浓度为 $9.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 即在分蘖期、越冬期和返青期对小麦产生 1 级影响,因此应控制挥发性脂肪酸浓度不超过 $9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图 4D)。



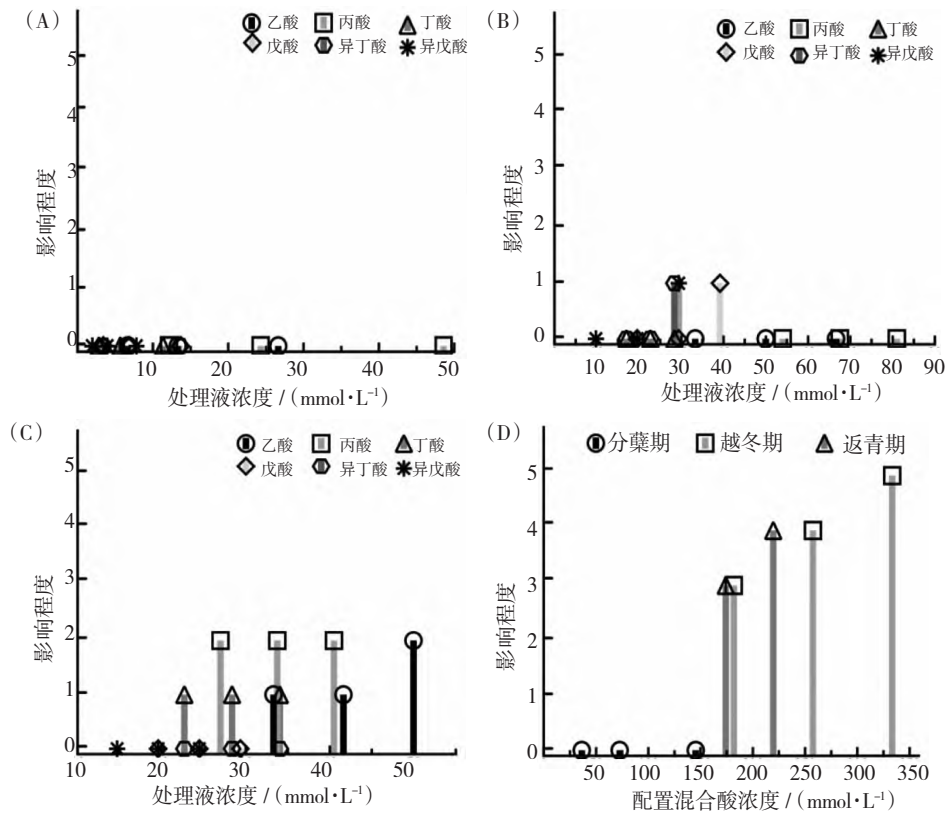
注: (A) 单酸在分蘖期对小麦生长的影响; (B) 单酸在越冬期对小麦生长的影响; (C) 单酸在拔节期对小麦生长的影响; (D) 混合酸在分蘖期、越冬期、返青期对小麦生长的影响。

图 4 pH 值 5.0 土壤中的挥发性脂肪酸对不同时期小麦的影响作用

沼液 VFAs 对碱性土壤 (pH 值 8.5) 的小麦生长影响作用如图 5。小麦分蘖期和返青期,各类挥发性脂肪酸对小麦均无明显影响(返青期与分蘖期一致,见图 5A);越冬期,乙酸、丙酸、丁酸对小麦无影响,而戊酸、异丁酸、异戊酸分别在施加浓度为 $39.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $28.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $29.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时表现出对小麦的 1 级影响作用(见图 5B);小麦拔节期,VFAs 浓度应控制在 $22 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下(见图

5C)。混合酸对不同时期作物的影响结果(见图 5D)表明,混合酸浓度超过 $174 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对作物产生明显的抑制作用(3~5 级影响)。

实际沼液中的 VFAs 对小麦生长的影响作用如图 6。对非碱性土壤 (pH 值 5.0), VFAs 对小麦产生 1 级影响的浓度为返青期 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、分蘖期 $18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (均超过 $9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),证实了上述所得安全浓度的有效性;在碱性土壤中,VFAs 浓度为 90

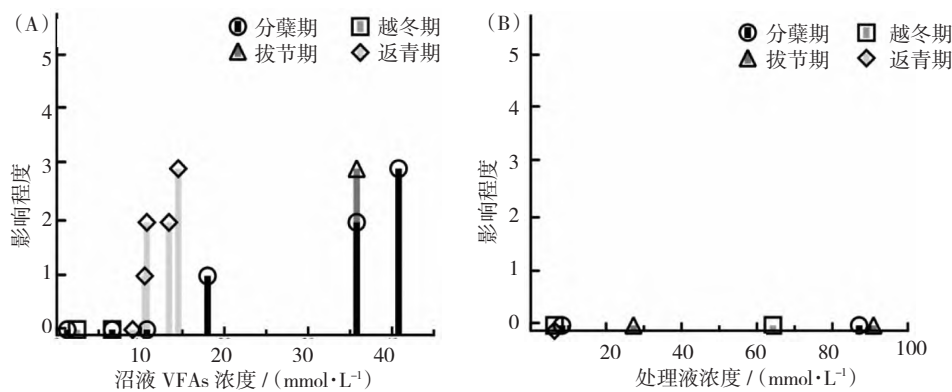


注: (A) 单酸在分蘖期对小麦生长的影响; (B) 单酸在越冬期对小麦生长的影响; (C) 单酸在拔节期对小麦生长的影响; (D) 配置混合酸在分蘖期、越冬期、返青期对小麦生长的影响。

图5 pH 值 8.5 土壤中的挥发性脂肪酸对不同时期小麦的影响作用

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时仍对作物无影响, 无需额外进行浓度控制。此外, 为适应不同作物时期和土壤性质, 应对不

同土壤 pH 值 (<7.5)、不同小麦时期进行挥发性脂肪酸的安全浓度把控。

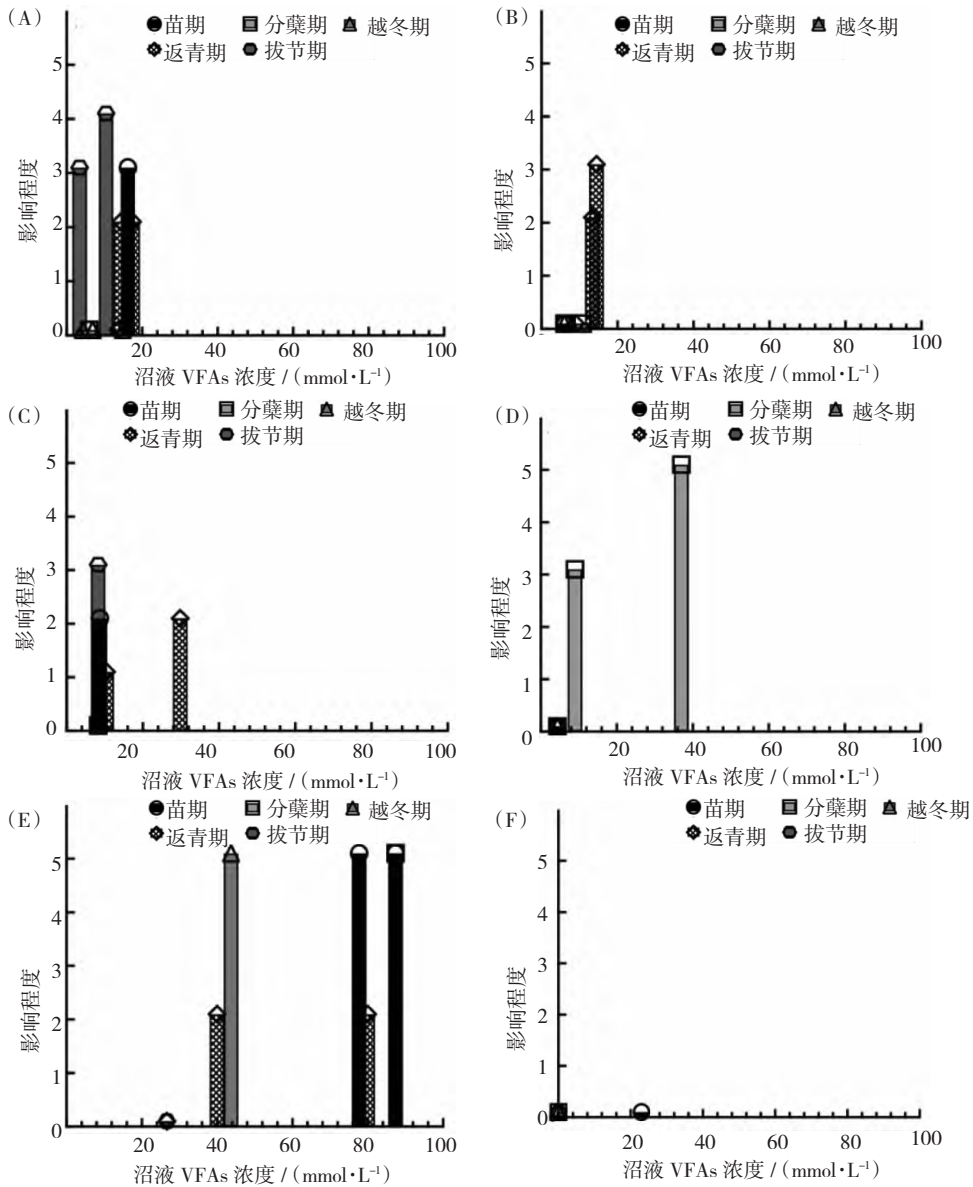


注: (A) 非碱性土壤; (B) 碱性土壤

图6 沼液在不同 pH 值土壤中对小麦的影响作用

选取 18 个不同生猪养殖场 (土壤 pH 值 4.5 ~ 7.5), 探究实际沼液中的 VFAs 在不同 pH 值土壤中对小麦生长的影响作用。根据图 7 的试验结果, 可以看出, VFAs 在酸性越强的土壤中对小麦的抑制作用更强: 在返青期产生 2 级影响作用时的浓度分别为 $13.40 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH 值 5.0) $< 14.30 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

(pH 值 4.5) $< 29.80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH 值 5.5) $< 40.00 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH 值 7.0), 这是由于 VFAs 在酸性较强的土壤中更容易转化为分子形式, 从而抑制作物生长。因此, 在沼液农用过程中, 土壤酸度提高时应降低 VFAs 浓度, 避免小麦生长受抑制。



注: (A) 土壤 pH 值 4.5; (B) 土壤 pH 值 5.0; (C) 土壤 pH 值 5.5; (D) 土壤 pH 值 6.0; (E) 土壤 pH 值 7.0; (F) 土壤 pH 值 7.5。

图 7 沼液在不同 pH 值土壤中对小麦生长的影响

2.4.2 无机离子

大田耕层相同全盐量溶液施加在碱性 (pH 值 8.5) 和非碱性 (pH 值 5.0) 土壤中, 均会提升土壤的全盐量。碱性土自身的土壤全盐量 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别施加全盐量 $16.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐溶液后, 土壤全盐量增加至 $6.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (提高 750%) 及 $7.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (提高 825%); 非碱性自身的土壤全盐量为 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别施加全盐量为 $15.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $19.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐溶液后, 土壤全盐量增加至 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (提高 128.5%) 及 $1.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (提高 171.4%)。由图 8 对比可知, 碱性土对无机离子的承载量远高于非碱性土, 表现出更强的保盐能力。这是由于非碱

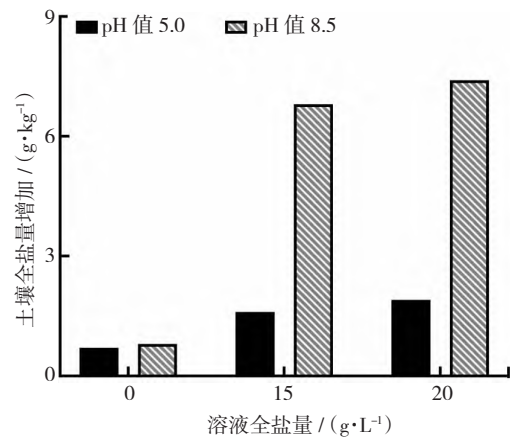


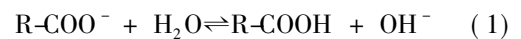
图 8 碱性和非碱性土壤的保盐能力对比

性土壤含有大量致酸离子 Al^{3+} 和 H^+ , 盐基饱和度小, 无机离子难以被土壤胶体吸附; 碱性土壤盐基饱和度高, 交换性无机离子占比高, 无机离子容易被土壤胶体吸附且不易淋溶流失。因此在相同施用量及浓度条件下, 无机离子在碱性土壤中对小麦产生抑制的临界浓度更低, 且抑制作用产生更早、影响周期更长。

3 基于挥发酸的猪粪沼液农用安全阈值

室内盆栽实验和大田试验表明, 沼液中的 VFAs 及无机离子均对小麦作物产生影响。其中, 挥发性脂肪酸对作物生长的影响主要源于三方面: 1) 抑制根系生长发育。根系细胞膜被酸破坏后, 引发细胞壁的加厚和木质化以抵挡酸进入细胞, 降低了根系的渗透性, 抑制根系细胞对养分的吸收。2) 影响植物生理活性。VFAs 在土壤中的积累影响植物体内生理生化酶活性, 包括叶绿素含量降低、抗氧化能力酶活性降低、线粒体内三磷酸酰胺 (ATP) 酶活性降低等, 植物呼吸、光合作用受阻, 导致植物生长不良^[23]。3) 作物自由基累积。pH 值越低, 酸积累导致植物处于逆境, 自由基含量过高, 影响细胞通透性^[24]。

结合本研究数据结果, 挥发性脂肪酸仅以分子形式存在时才会与抑制作物根系生长, 根据酸根水解的反应(见公式 1), 非碱性土壤中 H^+ 与水解产物 OH^- 进行酸碱中和反应, 促进酸根水解向正反应方向进行, 生成酸分子; 碱性土壤富含 OH^- , 抑制酸根水解。因此在非碱性土壤中, 分子形式的挥发性脂肪酸占比更大, 表现出更明显的作物抑制作用。此外, 酸根水解为吸热反应, 因此在温度较高的条件下, 反应正向进行, 产生酸分子, 同时加快酸分子对根系细胞腐蚀反应速率, 表现为高温条件下作物受抑制更为严重。因此应结合土壤 pH 值以及小麦不同时期, 细分挥发性脂肪酸的安全浓度标准, 避免对作物产生抑制。



研究表明, 长碳链挥发性脂肪酸对小麦的抑制作用最强, 理应以安全浓度为控制标准, 然而在猪粪尿的厌氧发酵过程中, 长碳链挥发性脂肪酸仅存在于酸化过程, 农用沼液中存在的长碳链挥发性脂肪酸较少, 因此需以挥发性脂肪酸总量为把控对象, 在实际过程中便于检测浓度, 避免沼液过量施用造成的风险。根据不同 pH 值土壤的作物受抑制作用结果得到最终标准(见表 6)。

表 6 小麦沼液资源化利用挥发性脂肪酸(VFAs)浓度阈值

土壤 pH 值	播前底肥	播后底肥	苗期至分蘖	分蘖后期	越冬期	返青拔节期
>7.5	不考虑	不考虑	不考虑	不考虑	不考虑	不考虑
7.5	不考虑	<45	<11	<23	<30	<18
6.5	不考虑	<30	<8	<15	<20	<12
5.5	不考虑	<20	<5	<10	<13	<8
5.0	不考虑	<16	<4	<9	<10	<6
4.5	不考虑	<13	<3	<7	<8	<5

注: 1) 上表数值为作物该时期最高耐受值; 2) 作物同一时期土壤 pH 值每降低 1, 酸的影响限值浓度降低约 1.5 倍。

此外, 无机离子表现出对小麦的抑制作用。然而无机离子的主要成分(见表 5)为植物所需的 N、P、K 等营养元素的盐基离子。在实际农用过程中, 沼液施用是基于测土配方进行, 测土配方调节和解决作物需肥与土壤供肥之间的矛盾, 同时有针对性地补充作物所需营养元素, 实现各种养分平衡供应。基于测土配方施加沼液时, 养分按需施用, 无机离子对小麦不产生抑制作用; 然而若长期施加超出小麦肥力需求的沼液, 会导致土壤剖面电导率的增加, 土壤无机离子的积累以及向土壤深层迁移, 给土壤环境带来较大的污染风险。因此在沼液农用过程中,

应以作物养分需求量为依据确定沼液施加量, 同时对土壤进行长期定点检测、实时评价, 避免作物生长抑制及土壤污染。

4 结论

(1) 挥发性脂肪酸(VFAs)是沼液中抑制作物生长的重要风险因子, 且在酸性土壤中对作物生长的抑制作用比碱性土壤强。实际农用过程中, 沼液作播前底肥施用无需控制 VFAs 浓度, 播后各时期需控制浓度, 且浓度阈值与土壤 pH 值和小麦生长期相关: pH 值 >7.5 的土壤无需控制浓度, pH 值

7.5 的土壤沼液播后底肥、分蘖期至苗期、分蘖后期、越冬期、返青拔节期的 VFAs 浓度分别不超过 $45 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $11 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $23 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，土壤 pH 值越低，VFAs 安全浓度越低。

(2) 沼液中的无机离子在盐基饱和度高的土壤(碱性土壤)中对小麦的抑制作用更强,然而由于无机离子的主要成分为 N、P、K,按照测土配方逻辑施用沼液易避免对作物或土壤产生危害,但需进行长期定点监测,避免无机离子富集造成风险。

(3) 建立沼液风险因子评价方法体系,系统性地对猪粪沼液进行成分和浓度分析,探究了风险因子在不同 pH 值土壤中对小麦生长的影响规律,从而确定沼液资源化利用风险因子把控标准,实现浓度精准施用。

参考文献:

- [1] 闫强. 规模化畜禽场的环境问题及防治措施 [J]. 畜牧兽医科技信息, 2021, 06: 34.
- [2] 张莉, 李瑞瑞, 刘文禧. 规模化畜禽养殖场项目环境影响评价要点分析 [J]. 资源节约与环保, 2022, 5: 132 - 134.
- [3] 王淑凤, 李维民. 规模化畜禽养殖场污染治理现状与对策 [J]. 畜牧兽医科学, 2019, 05: 16 - 17.
- [4] FAN D, WANG C, WU J, et al. Nonfarm employment, large-scale farm enterprises and farmland transfer in China: a spatial econometric analysis [J]. *Journal of the Asia Pacific Economy*, 2022, 27(1): 84 - 100.
- [5] 杨琴, 彭朝辉, 朱顺熙, 等. 养殖场沼液还田对作物及土壤重金属含量的影响 [J]. 中国沼气, 2021, 39(1): 22 - 25.
- [6] TIAN L, GUO H, WANG Y, et al. Unveiling the Mechanism of Urine Source Separation-Derived Pretreatment on Enhancing Short-Chain Fatty Acid Yields from Anaerobic Fermentation of Waste Activated Sludge [J]. *Environmental Science Technology*, 2022, 56: 16178 - 16188.
- [7] 李纤慧, 李建政, 张成成, 等. 畜禽粪便中抗生素抗性基因的分布特征及消减技术研究进展 [J]. 微生物学报, 2022, 62(12): 4740 - 4755.
- [8] WU L, WEI W, CHEN Z, et al. Long-chain alcohol production in open culture anaerobic fermentation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139225.
- [9] JI J, CHEN F, LIU S, et al. Co-production of biogas and humic acid using rice straw and pig manure as substrates through solid-state anaerobic fermentation and subsequent aerobic composting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115860.
- [10] 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.
- [11] 郑开红, 傅伦美. 用沼气发酵液防治小麦、豆类和蔬菜蚜虫试验 [J]. 中国沼气, 1989(3): 43.
- [12] 时振山, 张平, 李培乾, 等. 沼液防治小麦赤霉病的研究 [J]. 中国沼气, 1991(1): 11 - 14.
- [13] 任广鑫, 张正茂, 聂俊锋. 地膜冬小麦叶面喷肥的增产效应 [J]. 甘肃农业科技, 2001(6): 35 - 36.
- [14] 张无敌, 宋洪川, 韦小岩. 沼气发酵液浸种技术 [J]. 农业与技术, 2001(3): 14 - 18.
- [15] 魏章焕, 史努益, 陆新苗. 不同作物上沼液肥施用量优化增效试验研究 [J]. 上海农业科技, 2016(2): 97 - 100.
- [16] 岑汤校, 陈海生, 胡宇峰. 沼液施用量对淡涂泥田小麦产量的影响 [J]. 江西农业学报, 2012, 24(6): 93 - 95.
- [17] 邵文奇, 文廷刚, 唐金陵. 不同沼液施用量对小麦生长及产量的影响 [J]. 福建农业学报, 2018, 33(2): 144 - 149.
- [18] TANAKA A, NAVASERO S A. Carbon dioxide and organic acids in relation to the growth of rice [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 13(1): 25 - 30.
- [19] NIRANJAN RAO D, MIKKELSEN S. Effects of acetic, propionic, and butyric acids on rice seedling growth and nutrition [J]. *Plant and Soil*, 1977, 47(2): 323 - 334.
- [20] LYNCH J M. Effects of organic acids on the germination of seeds and growth of seedlings [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1980, 3: 255 - 259.
- [21] GOTOH S, ONIKURA Y. Organic acids in a flooded soil receiving added rice straw and their effect on the growth of rice [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 17(1): 1 - 8.
- [22] JEAN A, WILLIAM A. Rice and phragmites: effects of organic acids on growth, root permeability, and radial oxygen loss to the rhizosphere [J]. *American Journal of Botany*, 2001, 88(8): 1359 - 1370.
- [23] 杨浩娜, 周成言, 邬腊梅, 等. 植物化感物质的作用机理研究进展 [J]. 湖南农业科学, 2022, 3: 108 - 112.
- [24] CHANDRASAKARAN S, YOSHIDA T. Effect of organic acid transformations in submerged soils on growth of the rice plant [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 19(1): 39 - 45.