

# 基于 Meta 分析的沼液施用对作物-土壤系统效应的研究

王志刚<sup>1</sup>, 韩雪<sup>2</sup>, 徐少奇<sup>3</sup>, 魏雨泉<sup>3</sup>, 刘运平<sup>1</sup>, 裘浪<sup>4</sup>, 宋潇<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 王婷<sup>1</sup>, 郭立月<sup>5\*</sup>  
(1. 北京大北农科技集团股份有限公司, 北京 100095; 2. 北京东方园林环境股份有限公司, 北京 100015;  
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100093; 4. 宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽宿州 234000; 5. 中国科学院植物研究所, 北京 100094)

**摘要:** 定量分析沼液施用对作物产量和土壤肥力及重金属累积的综合效应, 旨在明确等氮沼液对作物产量、土壤肥力参数和重金属累积的影响, 为优化沼液施用综合管理措施, 发挥沼液施用积极效果提供数据参考。运用 Meta 分析方法将中英文数据库中已发表有关等氮沼液 (BS) 和全施化肥 (CF) 处理对作物和土壤肥力影响文献进行检索筛选, 共选出有效文献 62 篇, 获得可进行分析的试验数据 591 组。研究结果表明: 与全化肥处理相比施用沼液作物增产 7.62% 但差异不显著 ( $p = 0.07$ ); 土壤容重降低 6%、总孔隙度增加 14%、较大团聚体含量增加 10% ~ 20%, 差异显著 ( $p < 0.05$ ); 土壤有机质、总氮、速效磷、阳离子交换量和电导率增幅 6% ~ 20% 并导致盐分累积加剧 ( $p < 0.05$ ); 土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性及微生物碳氮含量、香农指数和辛普森指数增幅 6% ~ 21% ( $p < 0.001$ ); 土壤 Cu、Zn 和 As 含量比全化肥 (CF) 处理显著增加 10% ~ 18%。沼液施用对作物增产和土壤肥力提升显著正效应, 需要考虑沼液施用年限、土壤类型、作物种类, 严格控制施用量降低盐分和重金属累积风险, 实现沼液安全高效利用。

**关键词:** Meta 分析; 沼液; 作物-土壤系统; 综合效应

**中图分类号:** S153; S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)04-0003-08

**DOI:** 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023040003

**Study on the Crop Yield and Soil Fertility under the Biogas Slurry Application: A Meta-Analysis / WANG Zhigang<sup>1</sup>, HAN Xue<sup>2</sup>, XU Shaoqi<sup>3</sup>, WEI Yuquan<sup>3</sup>, LIU Yunping<sup>1</sup>, QIU Lang<sup>4</sup>, SONG Xiao<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>, GUO Liyue<sup>5\*</sup> / (1. Beijing Dabeinong Technology Group Co Ltd, Beijing 100095, China; 2. Beijing Orient Landscape & Environment Co Ltd, Beijing 100015, China; 3. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100093, China; 4. School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China; 5. Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)**

**Abstract:** This research is to analyze quantitatively the effects of biogas slurry (BS) application on crops yield and soil fertility and heavy metal accumulation in crop-soil system, so as to clarify the effects of BS with equivalent amount of nitrogen (N) fertilizer on crops yield, soil fertility parameters and heavy metal accumulation, which could provide data reference for optimizing the comprehensive management measures and exerting the positive effect of BS on crop-soil system. A meta-analysis was performed to search and screen the published literatures about the effect of BS and chemical fertilizer (CF) treatment on crops yield and soil fertility in Chinese-English document databases, and the database included 62 related studies and 591 pairs of experimental data. The results showed that crops yield increased by 7.62%, but the differences between BS and CF treatment were not significant ( $p = 0.07$ ); Compared with the CF treatment, soil bulk density in BS treatment decreased by 6% while the total porosity in soil increased by 14% and the larger aggregates contents increased significantly ( $p < 0.05$ ). Under BS treatment, soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, cation exchange and conductivity were increased by 6% ~ 20%, and the salt content was to some extent accumulated in topsoil ( $p < 0.05$ ). Soil urease, sucrase and phosphatase activities, and soil microbial carbon and nitrogen content, and Shannon index and Simpson

收稿日期: 2022-12-02 修回日期: 2023-02-11

项目来源: 企业自主科技创新项目-规模化猪场种养结合安全高效模式研究与示范 (DBN0059)

作者简介: 王志刚(1982-), 男, 回族, 河北怀来人, 高级工程师, 主要研究方向为农业废弃物资源化利用, E-mail: wzg6818691@126.com

通信作者: 郭立月, E-mail: guoliyue6789@126.com

increased by 6% ~ 21% ( $p < 0.001$ ). Compared with the CF treatment, soil Cu, Zn and As concentration in BS treatment were significantly increased range from 10% to 18%, respectively. Generally, the BS application remarkably enhanced crops yield and soil fertility, and more considerations should be taken on the BS application durations, soil types, crop varieties and strictly controls and rationally applies to reduce soil salinity and heavy metal accumulation risks, thus achieving BS efficient and safe utilization.

**Key words:** Meta-analysis; biogas slurry; soil-crop system; comprehensive effect

沼液是作物秸秆和畜禽粪便厌氧发酵形成的褐色液体,富含氮、磷、钾、腐殖酸、氨基酸、蛋白质是一种水溶性速效液体肥料,有利于改善土壤质量、维持土壤结构和提高作物品质和产量<sup>[1-5]</sup>。随着畜牧业迅猛发展养殖废弃物逐渐成为农村环境污染的主要来源<sup>[6-7]</sup>。据统计,2015年我国规模养殖粪污量38.34亿吨,其中氮磷含量分别为1229和204.6万吨,粪尿和废水的随意堆放对地表水体造成了严重污染<sup>[2]</sup>。因此,全面推进废弃物资源化利用是解决养殖污染问题的根本出路<sup>[8-9]</sup>。废弃物经厌氧发酵形成沼液对发展种养结合循环农业,以资源环境承载力为基准是促进种养二元结构优化和有机肥替代种植的技术要求。2019年以来国家相继出台《关于促进畜禽粪污还田利用加强养殖污染治理的指导意见》和《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》支持废弃物综合利用成为解决养殖污染问题政策保障<sup>[10]</sup>。20世纪90年代我国就开展了粮作、果树和蔬菜沼液还田研究,例如刘勇<sup>[11]</sup>等对温州蜜柑喷施5%沼液平均增产49.03%,果实可溶性固形物含量增加0.08%;严建辉<sup>[12]</sup>等发现柑橘施用沼液增产4.9%,果实总糖、可溶性固形物含量提高,总酸含量下降;潘绍坤<sup>[13]</sup>等认为茼蒿施用沼肥增产3.6%且增加维生素C和粗蛋白含量。因此,施用沼液作物增产提质同时改善土壤肥力;例如李金怀<sup>[14]</sup>等在广西果园连续3年施用沼液土壤全氮、全磷和全钾含量比常规施肥分别增加6.80%、13.05%和25.04%;曹易繁<sup>[15]</sup>等在江苏常熟施用 $600\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 沼液土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别比常规施肥提高8.9%、4.3%、7.1%和6.5%;杨知书<sup>[16]</sup>等采用<sup>15</sup>N丰度法发现沼液替代化肥 $\text{N}_2\text{O}$ 总生成量减少27%。此外,沼液中铬、砷、镉、铅、汞等重金属含量超标限制沼液还田<sup>[17]</sup>,2021年出台《农用沼液》标准(GB/T40750—2021)为沼液安全利用提供技术和政策依据。前人通过单点试验研究得出的结论受到区域条件、土壤类型、作物种类等影响不能全面客观反映沼

液施用效果;因此,通过大数据客观评价分析作物-土壤系统对沼液施用的响应非常必要。目前,沼液施用对作物产量或土壤肥力影响的研究大多从单一试验角度出发,并且基于某些特定试验点,研究结果只能回答特定条件下施用沼液的效果<sup>[18-24]</sup>;本研究拟采用整合分析方法(Meta-analysis)对国内外施用沼液独立试验结果进行综合分析。本研究在检索国内外发表的施用沼液研究基础上定量分析不同类型作物产量、土壤物理、化学、生物学参数影响和重金属累积效应,并探究施用沼液作物增产和土壤肥力之间的关系,以期明确沼液施用在不同作物、土壤肥力参数之间的差异,揭示沼液施用与作物-土壤系统的效应关系,为沼液安全高效科学使用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

为系统全面揭示沼液施用对作物-土壤系统的影响,本研究数据通过中国知网、万方、维普、Web of Science 和 Elsevier 等数据库获取,收集1990~2021年发表的关于沼液农田利用相关文献,以“沼液、沼肥、液体粪肥、biogas slurry、fermented liquid organic fertilizer、digested effluent、biogas fluid”与“作物产量、作物生产力、crop yield、crop productivity、crop production”与“土壤肥力、土壤质量、soil fertility、soil health”等3套关键词用于文献检索。根据研究目的设置等氮沼液为试验组( $X_1$ )、等氮化肥为对照组( $X_0$ )分析两种类型肥料对作物产量和土壤肥力的影响。检索文献使用以下标准筛选:1)研究区域为全球范围;2)同一文献中每一个独立试验均作为一个独立研究;3)同一文献必须同时包含试验组和对照组且纯氮施用量一致;4)有明确试验处理重复数与作物产量和某些土壤肥力参数;5)所有研究均为大田试验;6)使用0~20 cm表层土壤数据;7)试验地点、气候特征、土壤性状、沼液成分等信息明确表达;8)以柱状图和折线图表达的数据采用 GetDa-

ta Graph Digitizer 软件进行数字化转换提取。经筛选符合文献 62 篇,获得有效数据 591 组。如果文献提供数据是均值标准误,标准差通过公式(1)转换。公式如下:

$$SD = SE \times \sqrt{n} \quad (1)$$

式中:  $SD$  为标准差,  $SE$  为标准误,  $n$  为样本量。对于标准差和标准误均缺失的数据组,按照 Bracken 方法估计缺失的标准差<sup>[25]</sup>。

### 1.2 数据提取

根据试验归纳分组得到以下内容:作物类型、土壤肥力及重金属种类具体详见表 1。通过 Meta 亚组分析考察等氮沼液和等氮化肥两种类型肥料对作物-土壤系统的影响程度。

表 1 研究数据分组情况

影响因素	分类亚组
作物种类	玉米(21)、水稻(27)、小麦(9)、番茄(12)、茄子(6)、油菜(12)、黑麦草(6)
土壤物理参数/mm	容重(21)、总孔隙度(9)、团聚体 >5(12)、5~2(12)、2~1(12)、1~0.5(9)、0.5~0.25(12)、0.25~0.053(9)、<0.053(3)
土壤化学参数	pH 值(93)、有机质(129)、速效磷(108)、全氮(96)、速效钾(102)、阳离子交换量(12)、电导率(24)和全盐量(27)
土壤生物参数	微生物碳含量(15)、微生物氮含量(15)、磷酸酶活性(21)、脲酶活性(30)、蔗糖酶活性(24)、香农指数(12)、辛普森指数(6)、Chao 指数(9)和 Ace 指数(9)
重金属指标	铜含量(36)、锌含量(30)、铬含量(24)、镉含量(24)、汞含量(9)、铅含量(27)、砷含量(15)

注:括号内为每组中样本数量。

### 1.3 数据分析

本文采用 meta 分析方法研究相同施氮量下沼液和化肥两种肥料对作物产量、土壤肥力及重金属含量的影响。计算过程采用 Hedges 等计算方法,分析每一组数据效应值(RR)通过自然对数转换比较响应变量的效应大小<sup>[26]</sup>。RR 以试验组( $X_t$ )和对照组( $X_c$ )指标平均值比值自然对数计算,计算公式如下:

$$\ln RR = \ln(X_t/X_c) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中:RR 为响应比,  $X_t$  和  $X_c$  分别为试验组和对照组指标平均值。

Meta 分析是对各效应值加权计算,得到总体平均效应值  $\ln RR_{++}$ 。计算时,应先确定每项独立研究方差  $v$  和权重  $\omega$ ,公式如下:

$$v = \frac{SD_t^2}{N_t X_t} + \frac{SD_c^2}{N_c X_c} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{1}{v} \quad (4)$$

$$\ln RR_{++} = \frac{\sum (\ln RR_i \times \omega_i)}{\sum \omega_i} \quad (5)$$

式中:  $N_t$  和  $N_c$  分别为试验组和对照组样本量;  $SD_t$  和  $SD_c$  分别为试验组和对照组标准差;  $X_t$  和  $X_c$  分别为试验组和对照组平均值。

为反映效应值变异情况,通过公式(6)计算加权综合效应值  $\ln RR_{++}$  95% 置信区间(95% CI)。若未与零点线( $x=0$ )交叉,则表示与对照组相比试验组相关指标影响显著,反之不显著;若全部落在负半轴,表示相关指标有负效应,反之正效应。 $RR_{++}$  标准差  $S_{\ln RR_{++}}$  通过公式(7)计算。

$$95\% \text{ CI} = \ln RR_{++} \pm 1.96 S_{\ln RR_{++}} \quad (6)$$

$$S_{\ln RR_{++}} = \sqrt{\frac{1}{\sum \omega_i}} \quad (7)$$

为表现对作物产量和土壤肥力影响效应,根据公式(7)将指标  $\ln R_{++}$  转化为变化率。

$$E = (e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100\% \quad (8)$$

### 1.4 数据处理及统计分析

整合分析合并计数资料响应比得出加权平均响应,明确试验处理间及各试验结果是否存在异质性,采用 Egger test 和 Nfs 进行异质性检验。通过异质性检验结果确定分析模型,若分析结果不显著( $P_{Q\text{-val}} > 0.05$ )则试验结果无显著差异选用固定效应模型;若  $P_{Q\text{-val}} < 0.05$  表明试验结果差异显著选用随机效应模型。本研究统计结果经卡方检验  $p < 0.05$ ,因此选用随机效应模型计算综合效应值(见表 2);根据 95% 置信区间判断研究结果显著性。如果 95% CI 不与 0 值重叠且大于(小于)0 值表明结果显著说明沼液显著提高(降低)作物产量或土壤肥力参数。如果 95% CI 包含 0 值表明分析结果不显著,采用 Microsoft Excel 2010 记录数据并采用 R-studio 和 Metawin2.1 软件分析,Revman5.4 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 作物产量

总体上看,与等氮化肥对照组( $X_c$ )相比,等氮沼液试验组( $X_t$ )对选择的 7 种作物综合增产效应 7.62% (见图 1)。其中,等氮沼液试验组( $X_t$ )小麦增产最高为 16%;同样地,玉米和番茄均增产 14%、油菜产量提高 8% ( $p < 0.05$ )。水稻和黑麦草分别增产 1% 和 2% ( $p < 0.05$ ),茄子产量降低 11% ( $p <$

表2 综合效应样本描述性统计分析

项目	样本量	平均值	$Q$ -val	$df$	$P_{Q\text{-val}}$	$f^2$
作物产量	93	0.2576	17864	92	0.07	91%
土壤物理参数	99	0.3122	20315	98	0.03	93%
土壤化学参数	591	0.3015	16578	590	0.04	97%
土壤生物参数	141	0.2743	21347	140	0.001	94%
重金属指标	165	0.2872	19867	164	0.02	87%

注:  $Q$ -val 为异质性检验统计量;  $df$  为自由度;  $P_{Q\text{-val}}$  为显著性检验;  $f^2$  为研究间方差占总体方差比例。

0.05); 沼液对作物增产贡献顺序为: 小麦 > 玉米 > 番茄 > 油菜 > 黑麦草 > 水稻 > 茄子。在不同气候类型、土壤类型、沼液施用量、作物种类条件下, 沼液对作物生长促进作用的显著性和强度存在差异。与等氮化肥对照组 ( $X_c$ ) 相比, 施用沼液提供速效氮、磷、钾等营养被作物直接吸收利用, 同时沼液含有 90% 以上水成分一定程度上满足了作物关键生育期对水资源需求; 因此, 沼液提供大量速效养分和水资源是作物增产的主要原因。

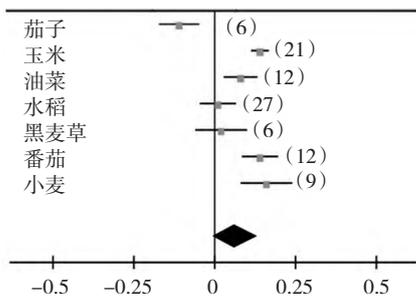


图1 沼液施用作物产量效应值

注: 图中浅色小方块与误差线分别代表响应比和 95% 置信区间, 若误差线不经过零线, 则说明试验组和对照组间差异显著; 括号中数字表示样本量。  $p < 0.05$  表示响应比之间具有显著性差异, 下同。

## 2.2 土壤物理性状

总体上看, 与等氮化肥对照组 ( $X_c$ ) 相比, 等氮沼液试验组 ( $X_1$ ) 对土壤容重、总孔隙度、大团聚体含量 ( $>5$  mm,  $5 \sim 2$  mm,  $2 \sim 1$  mm 和  $1 \sim 0.5$  mm) 具有显著改善效果 ( $p = 0.03$ ) (见图 2); 具体地, 施用沼液土壤总孔隙度增加 14%、容重降低 6%, 粒径  $>5$  mm,  $5 \sim 2$  mm,  $2 \sim 1$  mm 和  $1 \sim 0.5$  mm 团聚体含量分别增加了 12%、10%、10% 和 20%; 粒径  $0.5 \sim 0.25$  mm 团聚体含量下降 10% 转化为较大团聚体; 粒径  $<0.053$  mm 和  $0.25 \sim 0.053$  mm 团聚体含量分别降低 2% 和 5%, 同样地粒径  $<0.053$  mm 团聚体转化为粒径  $0.25 \sim 0.053$  mm 和  $0.5 \sim 0.25$  mm 团聚体。沼液为土壤提供更多的腐殖质和微生物菌丝及分泌物等胶结物质, 将较小团聚体转化为较大

团聚体使土壤颗粒之间毛管孔隙增加; 因此, 沼液降低土壤容重和增加孔隙度同时促进大团聚体形成。

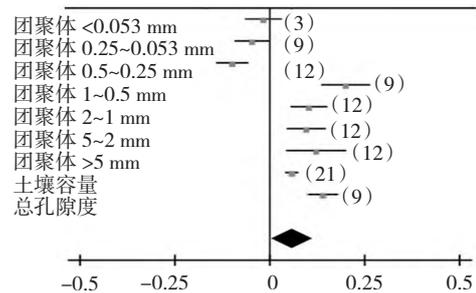


图2 沼液施用土壤物理性状效应值

## 2.3 土壤化学性状

总体上看, 与等氮化肥对照组 ( $X_c$ ) 相比, 等氮沼液试验组 ( $X_1$ ) 土壤全盐量显著增加 9% 可能对作物生长和土壤肥力产生不利影响; 全氮和有机质含量分别显著增加 8% 和 20%, 土壤速效磷、电导率和阳离子交换量增幅分别为 15%、13% 和 6% ( $p > 0.05$ ); 土壤 pH 值和速效钾含量分别提高 1% 和 3% (见图 3)。沼液中速效养分持续提高土壤肥力的同时沼液发酵过程中尚未被完全分解的纤维素、半纤维素等有机物质进入土壤被分解转化, 提高有机质含量; 此外, 沼液含有大量改善土壤结构的物质增加土壤保水性和保肥性, 为微生物生长提供良好环境, 分解、转化和释放土壤养分, 提升速效养分含量, 改善土壤结构根本上为作物创造高产条件。沼液中盐分含量超标未来可以选择强抗逆性高价值作

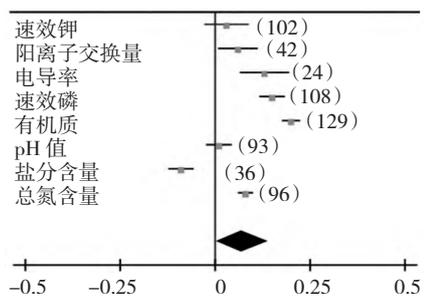


图3 沼液施用土壤化学性状效应值

物消纳沼液,减轻长期沼液灌溉农田负荷缓解农田盐渍化是重要技术手段。

### 2.4 土壤生物学性状

总体上看,与等氮化肥对照组( $X_c$ )相比,等氮沼液试验组( $X_l$ )土壤微生物碳氮含量分别增加13%和7%、磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性分别提高12%、13%和6%( $p < 0.05$ )(见图4)。土壤香农-维纳指数和辛普森指数分别显著增加14%和21%,但是对Ace和Chao两个指数无显著影响。土壤微生物量碳氮是土壤养分库中最活跃的组分,也是植物可利用营养重要来源,沼液施用增加根系生物量和根系分泌物为微生物提供充足碳源。此外,沼液中的铵态氮短时间内可能抑制微生物生长,导致对氮营养利用能力具有差异的微生物生长受到影响可能抑制微生物群落多样性。

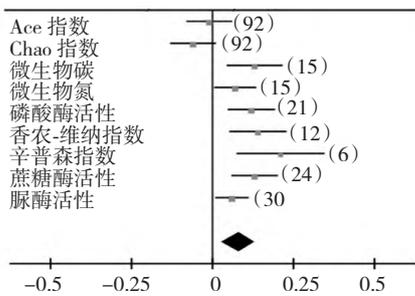


图4 沼液施用土壤生物性状效应值

### 2.5 土壤重金属含量

总体上看,与等氮化肥对照组( $X_c$ )相比,等氮沼液试验组( $X_l$ )土壤铜、锌和砷含量显著分别显著增加10%、18%和11%( $p < 0.05$ )(见图5),长期连续沼液还田可能导致土壤铜、锌和砷含量超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)规定限值要求;同时,土壤镉、铬、汞和铅含量分别增加3%、2%、2%和1%( $p > 0.05$ )。长期沼液灌溉土壤铜、锌、铅、镉等重金属产生累积效应;重金属从植物根系进入植物体并通

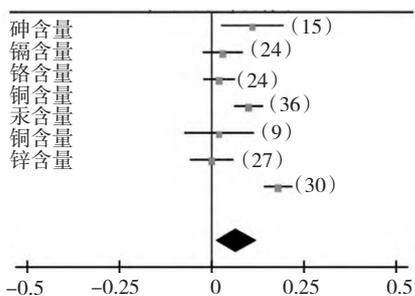


图5 沼液施用土壤重金属含量效应值

过食物链威胁人体健康,为降低沼液还田利用重金属污染风险和增加安全施用年限,一方面从源头控制饲料重金属添加剂投入降低沼液重金属含量;另外积极向土壤配施生物炭等重金属钝化材料尤为必要。

## 3 讨论

### 3.1 沼液还田对作物产量的影响

本文选择茄子、玉米、油菜、水稻、黑麦草、番茄和小麦7种作物,主要是基于这7种作物的研究较多且有足够试验数据用于分析。Meta分析结果表明沼液施用对作物产量作用总体上表现为显著提升达到7.62%(见图1),本研究结果与前人得出施用沼液显著提高作物产量和品质效果的结论基本一致。例如,王新燕<sup>[27]</sup>等发现沼液滴灌显著提高番茄产量和果实硬度、维生素和总糖含量,降低烂果率和硝酸盐含量;安金燕<sup>[28]</sup>等得出施用沼液降低脐橙果皮厚度,提高糖度同时增加产量;张璘玮<sup>[29]</sup>等通过3年连续定位试验也证实施用沼液油菜产量比常规施肥增加38%,同时油菜籽蛋白质、含油率等达到最佳水平。本研究表明合理施用沼液提高作物产量同时替代部分化肥,玉米、油菜、番茄和小麦增产幅度不同但均呈现显著正效应。茄子减产原因可能是试验结果多数为大棚种植,土壤累积较多硝酸盐和棚内高温高湿环境引起授粉率下降导致,未来应进行温室栽培条件下还田效应研究。多数情况下,施用沼液改善土壤环境促进作物发育,其次沼液提高作物维生素、矿物质和蛋白质含量,降低硝酸盐含量。本研究发现,旱地作物产量增产幅度高于水稻和大棚种植原因可能是旱地土壤较好的有氧环境加速沼液中氮矿化。

此外,沼液含水量达到90%以上,施用后一定程度上缓解干旱造成不利影响。沼液中未完全分解有机物继续发酵持久供应养分;提高作物产量和品质同时根本上改善土壤保肥保水能力,促进农业循环可持续发展。

### 3.2 沼液还田对土壤肥力和重金属含量的影响

本文选择土壤团聚体、容重、总孔隙度、速效养分、pH值、全盐量、酶活性、微生物碳氮含量、多样性指数及铜、锌等重金属作为评价指标,主要是文献中对上述指标进行系统研究且试验数据满足分析要求。Meta分析结果表明沼液施用后土壤全盐量和重金属含量具有增加趋势呈现一定环境风险,其它

土壤指标改善作用显著性和强度呈现正效应但因土壤因子和还田条件等不同而产生变化(见图 2~5)。因此,合理使用沼液减少化肥对土壤不良影响对维持土壤肥力与生物活性具有积极效果。结果表明,施用沼液降低土壤容重、增加孔隙度和细菌、真菌、放线菌数量改善土壤养分状况<sup>[4,30-31]</sup>。沼液增强磷酸酶活性加快有机磷转化,例如施用沼液增加玉米种植土壤有效磷,增加量 1.43~8.47 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[32]</sup>;李友强<sup>[33]</sup>和胡福初<sup>[34]</sup>等发现沼液增加小麦和果园土壤速效钾含量。但是,杨乐<sup>[35-36]</sup>等发现沼液增加土壤盐渍化风险,本研究也得出相似结论。

沼液还田土壤容重降低 6% 与肖洋和孙国锋<sup>[36-37]</sup>等发现沼液降低耕层土壤容重结论一致;张翠丽<sup>[38]</sup>等发现沼液可改善盐碱土容重,特别是对中度盐碱土改良效果更优。然而对土壤孔隙度的研究结论,叶旭君<sup>[39]</sup>等发现施用沼液土壤孔隙度增加 9.7%;肖洋<sup>[37]</sup>等认为沼液对土壤孔隙度无明显影响;同样郑莉<sup>[40]</sup>等发现连续 4 年施用沼液盐化潮土孔隙度无变化;但是,本研究土壤孔隙度和容重显著增加可能与粒径 > 0.5 mm 较大团聚体含量增加关系密切。例如王国海<sup>[41-42]</sup>等发现沼液还田土壤容重降低 0.113 g·cm<sup>-3</sup>,孔隙度增加 4.27%,原因是添加有机物料增加微团聚体的团聚性能,提高水稳性团聚体数量和增加土壤碳库储存并降低土壤紧实程度。

沼液还田土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性呈现显著正效应与冯丹妮<sup>[3]</sup>等关于黄壤水稻土酶活性变化的研究结果一致;土壤微生物碳氮含量分别增加 13% 和 7% 与管涛<sup>[43]</sup>和周伟<sup>[44]</sup>等发现麦田和林场土壤微生物碳氮含量分 8% 和 11% 结果类似。沼液改变土壤真菌细菌比例和组成,微生物碳氮比 3-6 细菌活性最高,碳氮比 7-12 真菌活性较高<sup>[4]</sup>,因此微生物分泌胞外聚合酶促进较大团聚体形成具有改善土壤结构促进抗旱保墒的作用。施用沼液改善土壤微生物香农指数和辛普森指数;周阳<sup>[45]</sup>等发现秸秆沼液配施还田年限越长多样性指数越高,可能与沼液提高土壤有机质和速效氮含量促进土著微生物生长成为优势种群有一定关系。

施用沼液土壤铜、锌和砷含量分别增加 10%、18% 和 11% 这与赵奇志<sup>[46]</sup>等 meta 分析证实沼液还田土壤铜、锌和砷含量提高 18.7%、26.3% 和 20.5% 结果一致,表明沼液是土壤重金属增加主要来源需要加强风险管控,防止土壤污染降低微生物

活性和破坏群落结构。有报道<sup>[47]</sup>表明饲料硫酸铜、锌含量分别为 100~250 mg·kg<sup>-1</sup> 和 2000~3000 mg·kg<sup>-1</sup>,动物吸收后大部分随粪便排泄增加沼液还田风险。汤逸帆<sup>[48]</sup>对江苏滨海稻麦轮作土壤施用沼液 0 年、3 年和 5 年,结果表明 3 年和 5 年后土壤和作物籽粒铜、锌、镉和铅含量虽未超标,但 0~15 cm 水稻季和小麦季土壤铜累积速度分别 1.13 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.74 mg·kg<sup>-1</sup>,锌累积速度分别为每年 3.80 mg·kg<sup>-1</sup> 和 2.83 mg·kg<sup>-1</sup>,加速土壤铜和锌累积速度;Bian<sup>[49]</sup>等对太湖地区居民潜在健康风险评估发现沼液还田是粮食及土壤重金属积累主要原因;蔬菜和谷物易受到铅污染超出卫生部门规定允许限量,重金属通过土壤-根系界面被植物吸收在作物中积累产生严重危害<sup>[50]</sup>。

本研究应用 Meta 分析定量评价沼液对作物增产和土壤肥力改善效应,一定程度上量化沼液对作物-土壤系统贡献程度和风险阈值。此外,沼液施用效应受区域气候、土壤类型、降雨量、灌溉方式、施肥制度、还田量等因素交互作用影响本研究并未涉及。但是,本研究对掌握大区域尺度沼液还田效果具有一定参考价值。未来应针对主要气候区和作物品种、土壤类型、还田条件及沼液类型开展精准化沼液还田效应分析,推动区域化种养结合技术发展。

#### 4 结论

(1) 本研究应用 Meta 分析方法定量评价沼液对作物-土壤系统影响效应,结果表明施用沼液作物产量提高 7.62% 同时对团聚体含量、容重、孔隙度、酶活性、微生物碳氮含量和多样性指数等产生正效应,长期沼液还田增加盐分和重金属累积风险。

(2) 本研究未统计沼液还田年限对作物-土壤系统影响效应,重要的是为降低沼液施用重金属污染风险和增加安全施用年限,从源头控制饲料重金属添加剂降低沼液重金属含量,积极向土壤中配施生物炭等钝化材料降低重金属物质的生物有效性。

(3) 对沼液直接添加养分、微生物菌剂、生长调节剂或与其它产品配合复配成专用液态有机肥料用于农业生产,提升沼液产品价值和优化沼液施用技术,研发高值、功能化产品,实现沼液多元化利用并建立长期定位试验科学评估沼液还田效果。

#### 参考文献:

- [1] 邓良伟. 沼气工程[M]. 北京:科学出版社, 2015.

- [2] 张春, 郑利兵, 郁达伟, 等. 沼液处理与资源化利用现状与展望[J]. 中国沼气, 2018, 36(5):36-46.
- [3] 冯丹妮, 伍钧, 杨刚, 等. 连续定位施用沼液对水旱轮作耕层土壤微生物区系及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8):1644-1651.
- [4] 郑学博, 樊剑波, 崔键, 等. 沼液还田对旱地红壤微生物群落代谢与多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18):1-11.
- [5] 王静童, 王勇, 殷金忠, 等. 短期沼液还田对小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2019, 47(4):5-9.
- [6] 左狄, 吕卫光, 李双喜, 等. 沼液还田对稻田土壤养分与氮循环微生物的影响[J]. 上海农业学报, 2018, 34(2):55-59.
- [7] 高刘, 余雪标, 李然, 等. 沼液配方肥对香蕉产量、品质及香蕉园土壤质量的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(2):209-215.
- [8] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5):103-111.
- [9] 宣梦, 许振成, 吴根义, 等. 我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2):126-132.
- [10] 王强, 李智俊, 李飞. 荆州市畜禽粪污资源化利用方式与思考[J]. 中国畜牧业, 2023, 68-69.
- [11] 刘勇, 胡俊林, 刘善军, 等. 施用沼液对柑桔生长与结果的影响[J]. 中国沼气, 1999, 17(3):33-34.
- [12] 严建辉, 刘雯, 陈瑞英, 等. 柑橘园施用有机肥效应试验[J]. 福建果树, 2012, (2):16-18.
- [13] 潘绍坤, 刘磊, 陈玲, 等. 施用沼肥对茼蒿产量和品质的影响[J]. 中国沼气, 2015, 33(4):85-87.
- [14] 李金怀, 李林维, 魏世清, 等. 沼液对果树种植土壤肥力的影响[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(7):51-52,62.
- [15] 曹易繁, 彭先进. 沼液施用对青贮小麦产量品质和土壤养分的影响[J]. 农业与技术, 2022, 42(10):90-93.
- [16] 杨知书, 徐传红, 汤逸帆, 等. 沼液替代化肥及与秸秆联用对稻田土壤反硝化和硝态氮氨化潜力的影响[J]. 土壤学报, 2022, 30(7):1-13.
- [17] 伍玉琴, 黄娟, 饶凤琴, 等. 浙江省重点地区猪粪中重金属含量及安全施用评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3):703-711.
- [18] Michael B, Larry V, Julian P, et al. Introduction to Meta-Analysis[M]. Cornwall: A John Wiley and Sons Ltd Publication, 2009:62-79.
- [19] Jessica G, Peter S, Michael H. Meta-analysis in ecology[J]. Advances in Ecological Research, 2001, 32(1):199-247.
- [20] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. 农业工程学报, 2015(24):1-7.
- [21] 郭明, 李新. Meta 分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5):911-919.
- [22] 张玲椿, 张鑫月, 高强, 等. 基于 Meta 分析的我国华北地区氮肥施用对玉米增产效应研究[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(8):550-557.
- [23] 李帅帅, 张雄志, 刘冰洋, 等. Meta 分析湖南省双季稻田甲烷排放影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12):124-132.
- [24] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta 分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):99-107.
- [25] Brachen M. Effective Care of the Newborn Infant[J]. Archives of Disease in Childhood, 1992, 67(11):1415-1416.
- [26] Hedges LV, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4):1150-1156.
- [27] 王新燕, 刘永刚, 石强. 沼液滴灌对加工番茄品质和产量的影响[J]. 中国沼气, 2013, 31(6):59-62.
- [28] 安金燕, 蒙建邦, 韦忠凯, 等. 施用沼肥对脐橙产量与品质的影响[J]. 耕作与栽培, 2013, 1:24-25.
- [29] 张璘玮, 伍钧, 杨刚, 等. 猪粪沼液连续定位施用对油菜产量及菜籽品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):562-568.
- [30] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16):3201-3210.
- [31] 张媛, 洪坚平, 王伟, 等. 沼液对石灰性土壤速效养分含量的影响[J]. 中国沼气, 2008, 26(2):14-16.
- [32] 唐华, 郭彦军, 李智燕, 等. 沼液灌溉对黑麦草生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6):939-942.
- [33] 李友强, 盛康, 彭思蛟, 等. 沼液施用量对小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12):181-186.
- [34] 胡福初, 何凡, 范鸿雁, 等. 沼液对荔枝果园土壤肥效及果实产量与品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 1:42-45.
- [35] 杨乐, 王开勇, 庞玮, 等. 新疆绿洲区连续五年施用沼液对农田土壤质量的影响[J]. 中国土壤与肥料,

- 2012, 5:17 – 21.
- [36] 孙国锋, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用后土壤理化性状及水稻产量初步研究[J]. 中国稻米, 2013, 19(4): 74 – 76, 79.
- [37] 肖洋, 田里, 路运才, 等. 沼液和沼渣及化肥配施对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 78 – 81.
- [38] 张翠丽, 卜东升, 曹琦. 沼液沼渣改良盐碱土试验初报[J]. 塔里木大学学报, 2014, 26(1): 114 – 118.
- [39] 叶旭君, 王兆骞, 李全胜. 以沼气工程为纽带的生态农业工程模式及效益分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16:2.
- [40] 郑莉. 沼液施用对黄淮海平原盐化潮土土壤结构稳定性的影响[D]. 北京, 中国农业科学院, 2020.
- [41] 王国海, 翟静. 沼液对土壤改良的作用[J]. 北京农业, 2015, 3:92.
- [42] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕转深松和秸秆还田增加土壤团聚体碳库[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 133 – 140.
- [43] 管涛, 冯伟, 王华岑, 等. 追施沼液对冬小麦根际土壤微生物活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 721 – 726.
- [44] 周伟, 徐莉, 俞元春, 等. 沼液施肥对杨树林地土壤微生物量碳氮的影响[J]. 森林资源培育, 2015, 29(1): 49 – 51.
- [45] 周阳, 黄旭, 赵海燕, 等. 麦秸秆和沼液配施对水稻苗期生长和土壤微生物的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 479 – 489.
- [46] 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 等. 沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响: Meta 分析[J]. 环境科学, 2022, 13(2): 1 – 12.
- [47] 王一佩. 沼液浇灌强度对土壤和植物养分与重金属含量的影响[D]. 桂林: 广西大学, 2018.
- [48] 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.
- [49] Bian B, Zhou L J, Li L, et al. Risk assessment of heavy metals in air, water, vegetables, grains, and related soils irrigated with biogas slurry in Taihu Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(10): 7794 – 7807.
- [50] Sakizadeh M, Ghorbani H. Concentration of heavy metals in soil and staple crops and the associated health risk[J]. Archives of Hygiene Sciences, 2017, 6(4): 303 – 313.