

典型沼液养分特征及环境风险评价

罗心雨¹, 曹丁戈¹, 刘婉岑¹, 夏若涵¹, 李国学¹, 罗文海¹, 崔文静^{2*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2. 青岛农业大学 人文社会科学学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 为了研究不同有机物料厌氧发酵产生的沼液中养分特征以及环境风险, 选取 7 种典型有机废弃物源沼液进行对比, 结果表明: 尽管不同沼液的无机养分含量差异较大, 但整体呈现总氮(TN) > 总钾(TK) > 总磷(TP) 的趋势, 总养分含量为 1.2 ~ 11.5 g·L⁻¹, 中微量元素含量仅为 84 ~ 2294 mg·L⁻¹, 远低于相关液态肥料标准(2 ~ 30 g), 可进一步浓缩, 实现高值利用。畜禽粪便原料的沼液比其他沼液的抗生素和重金属含量都高, 但污染程度安全性评估风险系数均小于 1, 不具有环境风险。相比较而言, 鸡粪沼液养分均衡, 还富含 9.7 mg·L⁻¹ 氨基酸, 明显高于其他原料的沼液。尽管畜禽粪便沼液的重金属以及猪粪沼液的抗生素残留不具有环境风险, 但是其较高的含量仍需要进一步消减控制, 以保障沼液的安全肥料化利用。

关键词: 沼液; 养分; 抗生素; 重金属; 环境风险

中图分类号: S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)04-0046-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023040046

Nutrient Characteristics and Environmental Risk Assessment of Typical Biogas Slurry / LUO Xinyu¹, CAO Dingge¹, LIU Wancen¹, XIA Ruohan¹, LI Guoxue¹, LUO Wenhai¹, CUI Wenjing^{2*} / (1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Humanities and Social Sciences, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Biogas slurry from the anaerobic digestion of seven different organic wastes was collected to nutrient properties and environmental risks. Results showed that although inorganic nutrient contents in biogas slurry varied notably, in response to different organic wastes general profiles were as total nitrogen (TN) > total potassium (TK) > total phosphorus (TP), was overall contents of nutrients at 1.2 ~ 11.5 g·L⁻¹, and trace-medium elements at only 84 ~ 2294 mg·L⁻¹, which however, were lower than those required by relevant liquid fertilizer standards (i. e. 2 ~ 30 g). Of all investigated organic wastes, biogas slurry from livestock manure contained much higher concentrations of antibiotics and heavy metals. Nevertheless the risk coefficient of pollution degree safety assessment was less than 1 for all samples, indicating their insignificant environmental risks. Compared to other organic wastes, chicken manure led to high quality biogas slurry with balanced nutrients and high abundance of amino acid at 9.7 mg L⁻¹. It is noteworthy that although there remained insignificant environmental risks, heavy metals in biogas slurry of all livestock manures and antibiotics in that of swine manure should be further mitigated and or controlled to secure safe fertilization.

Key words: biogas slurry; nutrients; antibiotics; heavy metal; environmental risks

随着经济的快速发展,集约化、规模化的农业生产过程产生了大量有机废弃物。厌氧发酵技术能够实现有机废弃物的处理与资源化利用。我国的厌氧发酵技术主要以湿法发酵为主,会产生大量的沼液,年产量已超过 10 亿吨,主要集于大中型沼气工程^[1]。沼液中富含氮、磷、钾和腐植酸、氨基酸等对植物有益的物质,可作为高效的液态有机肥料,有助

于改善土壤质量,提高作物产量和品质。例如,用沼液与化肥配施,西红柿果实中可溶性糖的含量增加了 36.5%,产量提高了 1.6 倍^[2]。同时,沼液可改善土壤构造,为作物提供肥力,将玉米产量提高 19.8%^[3]。然而,不同有机物料厌氧发酵产生的沼液性质差异较大。有研究表明,高木质纤维素含量的秸秆、牛粪等原料厌氧发酵残余的沼液中含固率

收稿日期: 2022-10-26 修回日期: 2022-11-09

项目来源: 中国科学技术协会青年人才托举工程项目(YESS20200124)

作者简介: 罗心雨(1999-),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事养分管理和绿色种植研究等工作, E-mail: luoxinyu991008@163.com

通信作者: 崔文静, E-mail: cuiwenjing910311@cau.edu.cn

(TS)含量较高^[4];而富含蛋白质和脂质等有机质的猪粪、鸡粪发酵产生的沼液具有较高的养分和微量元素^[5]。沼液中养分性质的差异,会影响沼液肥料化利用。此外,有机废弃物,特别是畜禽粪污富含重金属和抗生素等风险污染物,在厌氧发酵过程中消除效率低,从而残留于沼液中,影响沼液的安全利用。然而,当前针对不同废弃物源沼液的性质对比较少,特别是残留污染物的环境风险程度尚不清楚。因此,通过收集当前常见的有机废弃物源沼液,系统分析不同沼液的养分特性、污染风险作用对沼液的肥料化安全利用十分有意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的不同废弃物源沼液分别取自北京市郊区、苏州市郊区、山东蓬莱市长期稳定运行的厌氧发酵工程。发酵原料及工艺条件如表1所示。为保证不同废弃物源沼液采样的代表性,每类沼液取样点位不少于3个厌氧发酵工程。样品取自各发酵工程配套的沼液贮存池池中经自然沉降后的上层清液,取样量为30 L。样品取回后置于密闭的塑料桶中,于4℃保存,进行后续理化特性分析。

表1 基于有机废弃物原料及发酵工艺的沼液分类($n \geq 20$)

编号	原料	发酵工艺	发酵天数/d	沼液 TS/%
1	猪粪	连续搅拌反应器	15~20	4~6
2	牛粪	上流式厌氧污泥床	15~20	5~8
3	鸡粪	升流式固体反应器	15~20	8~10
4	厨余	升流式固体反应器	5~7	4~6
5	秸秆	全混式厌氧发酵反应器	15~20	15~20
6	酒糟	全混式厌氧发酵反应器	7~10	6~10
7	豌豆废水	上流式厌氧污泥床	5~7	4~6

1.2 测定项目及分析方法

1.2.1 总氮(TN)和总磷(TP)度的测定

利用碱性过硫酸钾法,进行比色测定。具体TN的测定利用分光光度计(N4s,上海仪电,上海)在220 nm和275 nm处测定吸光度。TP是测定700 nm处的吸光度。最后利用标准曲线法,确定TN和TP的浓度。

1.2.2 钾离子(K^+)、钙离子(Ca^{2+})和镁离子(Mg^{2+})含量测定

利用离子色谱仪(Aquion, ThermoFisher, 美国)进行测定。其中, K^+ 和 Ca^{2+} 测定需将样品浓度稀

释至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内, Mg^{2+} 测定稀释至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内。

1.2.3 化学需氧量(COD)浓度测定

利用重铬酸钾快速消化分光光度法进行测定。

利用紫外可见光分光光度计(N4s,上海仪电,上海)于波长605 nm处比色。通过配置的COD标准液测定,形成标准曲线,计算样品COD浓度。

1.2.4 腐植酸测定

采用《含腐植酸水溶肥-NY 1106—2010》方法测定。

取5 mL沼液样品,放入50 mL聚四氟乙烯离心管,加入1 mL的 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液和6 mL的 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸溶液,离心后去除上清液,用定量的重铬酸钾-硫酸混合溶液氧化固体中有机碳,再用硫酸亚铁滴定剩余的重铬酸钾。利用公式(1)计算腐植酸含量($W, \%$):

$$W(\%) = \frac{(V1 - V2) \times c \times D \times 1.724 \times 0.003 \times 1.43}{m} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.5 氨基酸测定

采用《含氨基酸水溶肥-NY/T 1975—2010》方法测定。利用氨基酸自动分析仪,用外标法测定试样溶液中游离氨基酸的含量。按公式(2)计算:

$$W = \sum_{i=1}^k \frac{n_i M_i D V_1 \times 10^3}{m V \times 10^9} \times 100 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i M_i D V_1}{m V} \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中: k 是氨基酸的种类数; n_i 是仪器进样体积 V 中第 i 种氨基酸的物质的量,nml; M_i 是第 i 种氨基酸的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; D 是测定时试样溶液的稀释倍数; V_i 是定容体积,mL; m 是试料的质量,g; V 是仪器进样体积, μL 。

1.2.6 金属元素测定

利用电感耦合等离子体发射光谱仪(710 ICP-OES, 安捷伦, 美国),测定沼液离心后的上清液和悬浮颗粒物的提取液的铜(Cu)、砷(As)、铬(Cr)、铅(Pb)、锌(Zn)和铁(Fe)含量。

1.2.7 抗生素测定

采用固相萃取(SPE)、衍生化和超高效液相色谱串联质谱(UPLC-MS/MS, Milford, 美国)相结合的定量分析方法^[6],分析17种常见抗生素。

1.2.8 污染程度安全性评估

采用单因子污染指数法进行沼液重金属和抗生素的污染程度安全性评估^[7],初步分析沼液肥料化利用的环境风险。具体计算如公式(3)。

$$I = \frac{Ci}{Si} \quad (3)$$

式中： I 为沼液中重金属或抗生素的超限比； C_i 是沼液中某个重金属或抗生素浓度； S_i 是沼液中环境风险物对应的评价标准。针对重金属和抗生素分析，采用的评价标准分别为《沼肥施用技术规范》(NY/T2065—2011)(见表 2)和《商品有机肥抗生素残留》(T/ZNZ037—2020)(见表 3)。

表 2 沼肥施用技术规范(NY/T2065—2011)

编号	项 目	浓度限值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	总镉(以 Cd 计)	≤ 3
2	总汞(以 Hg 计)	≤ 5
3	总铅(以 Pb 计)	≤ 100
4	总铬(以 Cr 计)	≤ 300
5	总砷(以 As 计)	≤ 700

表 3 商品有机肥抗生素残留要求(T/ZNZ037—2020)

编号	项 目	浓度限值 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	磺胺类	≤ 0.5
2	四环素类	≤ 0.5

采用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行数据统计分析。采用 Origin Pro 2022(学习版)软件作图。

2 结果与讨论

2.1 沼液的养分含量

由图 1 所示,尽管不同沼液的无机养分含量差异较大,但整体呈现 $\text{TN} > \text{TK} > \text{TP}$ 的趋势,说明不同原料沼液的总养分含量主要取决于 TN。各沼液 TN 含量较高主要因为原料普遍含有较多的蛋白质、粗脂肪等含氮物质。在这 7 种沼液中,以豌豆废水为原料的沼液 TN 含量最高,超过 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,主要是因

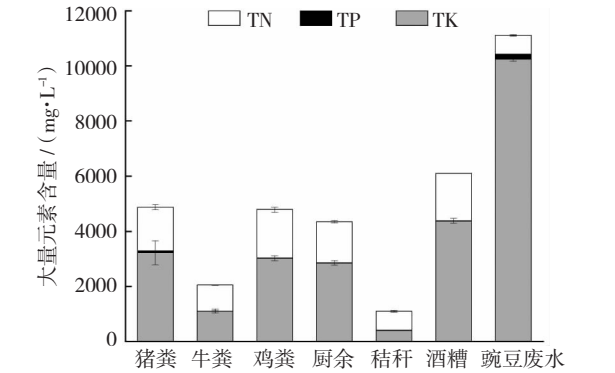


图 1 不同有机废弃物源沼液中大量元素养分含量

为豌豆的氨基酸等含氮类物质较高,一般达 $208\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [8]。鸡粪、猪粪及酒糟沼液的 TN 含量是 $3028\sim 4375\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是处于居中的数值,可能是因为富含粗蛋白和尿素、肌酸酐等非蛋白氮素化合物转化为沼液中的 NH_4^+-N [9]。然而,牛粪和秸秆中 TN 含量最低,主要是这两类废弃物的有机质以木质纤维素为主[10]。

鸡粪、猪粪、酒糟沼液的 TK 含量相似,约 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于其他原料沼液(见图 1)。其中,鸡粪和猪粪沼液 TK 含量较高可能是因为鸡和猪饲养过程饲喂甲酸钾等饲料,造成粪便中 TK 的含量较高[11-13]。酒糟原料主要为高粱、小麦和葡萄等富含钾的作物,造成发酵残留沼液的 TK 含量较高[14]。已有研究表明,厨余垃圾中 TK 含量一般在 $4\%\sim 8\%$ [15],造成其沼液 TK 含量居中,达 $1487\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相比之下,牛粪和秸秆沼液的 TK 含量最低,仅在 $680\sim 940\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,可能是因为这类高木质纤维素废弃物分解不完全, K^+ 溶出率低[16]。此外,由于豌豆中的 TK 仅为 $0.71\%\sim 1.02\%$ [17,18],造成豌豆废水沼液 TK 偏低。与 TN 和 TK 相比,不同沼液的 TP 含量整体较低。大量研究表明,有机废弃物在厌氧发酵过程中,不同形态的磷元素易与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 等离子结合生成磷酸盐沉淀,赋存于沼渣相,导致沼液的 TP 含量低[19]。尽管如此,由于豌豆废水沼液中富含氨基酸、蛋白质等物质[8],其沼液的 TP 含量远高于其他废弃物源沼液。

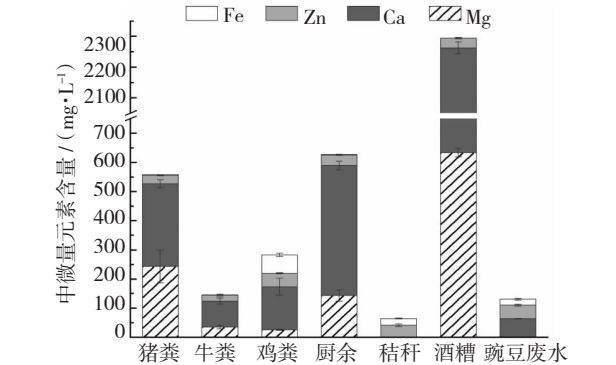


图 2 不同有机废弃物源沼液中微量元素养分含量

在图 2 中可以看出,与大量元素相比,沼液中的中微量元素含量较低,主要为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。不同有机废弃物源沼液中,酒糟沼液的中微量元素含量最高,总量超过了 $2.2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,主要是因为酒糟富含 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等中量元素,可达 $0.3\text{ mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$ [20]。厨余和猪粪沼液的中微量元素含量略低于酒糟沼

液,其中厨余垃圾中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等微量元素来自蛋壳、碎骨等组分^[21,22];由于猪饲养过程中精饲料的投入,使粪尿中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较高^[23]。相比之下,牛粪和秸秆两类高木质纤维素废弃物的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较低,且在厌氧发酵过程中不易被降解释放^[16],导致其沼液的中量元素水平不高。

综合分析不同有机废弃物源沼液的养分总量可知,7种沼液的 $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ 总养分含量为 $1.2 \sim 11.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,明显低于我国水溶肥类相关标准的要求($40 \sim 500 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)。虽然上述沼液富含微量元素,具有较高的肥料化利用潜力,但整体含量仅为 $0.08 \sim 2.29 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,同样远低于相关标准($20 \sim 100 \text{ g}$),需进一步提高沼液养分含量,实现沼液高值利用。

秸秆沼液的腐植酸含量是 $6.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,是7种沼液中最高的,其次为含量类似的酒糟、厨余和豌豆废水沼液($2.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)。相比之下,3种畜禽粪便类沼液的腐植酸含量较低,可能是因为其中的有机物主要为类诺氨酸等蛋白类物质,易被厌氧微生物利用^[24](见图3)。尽管如此,这7种沼液的腐植酸含量仍低于《含腐植酸水溶肥标准》(NY 1106—2010)所规定的腐植酸 $\geq 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的要求,需进一步提高浓度,以促进沼液高值肥料化利用。

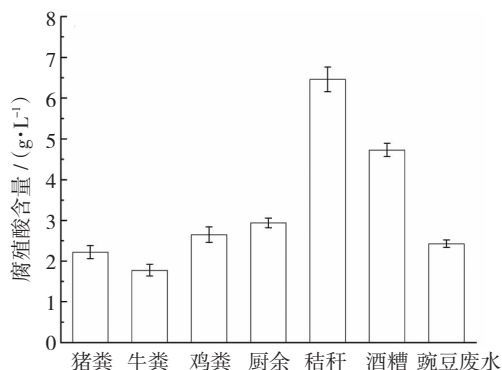


图3 不同有机废弃物源沼液腐植酸含量

由于鸡粪富含饲料中残留的粗蛋白和粗脂肪,经过厌氧发酵降解成氨基酸等小分子的物质^[25]。此外,鸡粪还含有尿素、肌酸酐等非蛋白氮素化合物,可通过非氨基重建合成氨基酸^[26]。因此,鸡粪沼液的氨基酸含量是 $9.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显高于其他原料的沼液,但仍然远低于《含氨基酸水溶肥料》(NY 1429—2010)所规定的氨基酸 $\geq 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的要求。进一步细化氨基酸种类可知,鸡粪沼液较高的氨基酸含量主要归因于苯丙氨酸(见图4)。这可能是由于鸡饲料中含有促进雏鸡肌肉合成的苯丙氨酸^[27]。

除鸡粪沼液外,其他6种沼液的氨基酸含量类似,在 $1.7 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,主要由天冬氨酸、谷氨酸和苏氨酸构成。已有研究表明,有机废弃物厌氧发酵过程,碳水化合物、粗蛋白和脂肪等大分子有机物降解,会产生谷氨酸等氨基酸^[28]。

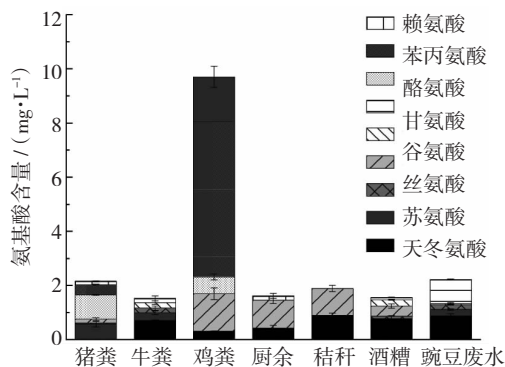


图4 不同有机废弃物源沼液氨基酸含量

2.2 沼液的环境风险评价

2.2.1 沼液的重金属含量及其环境风险评价

尽管不同沼液中的重金属含量存在差异,但根据图5所示,整体均以As和Cu为主,含量分别达到 10.8 和 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。以畜禽粪便为原料的沼液中重金属含量普遍高于其他废弃物源沼液,这主要是因为饲养过程中,通常饲喂高剂量的有机砷、对氨基苯砷酸及其洛克沙砷和硫酸铜等饲料添加剂,以控制疾病和提高饲料消化率,从而导致了粪便中As和Cu残留量较大^[29]。此外,畜禽粪便中均含有 $1.4 \sim 1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Cr,其中鸡粪沼液的含量较高,达到了 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能与肉鸡饲养过程中饲喂酵母铬用于提高肉鸡成活率与瘦肉率有关^[30]。同时,重金属是不可生物降解的,在厌氧发酵过程中可能累积在沼液中^[6]。与畜禽粪便不同,秸秆、厨余、豌豆废水和酒糟沼液中重金属含量整体较低,总量均低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这主要是由于其最初原材料均为

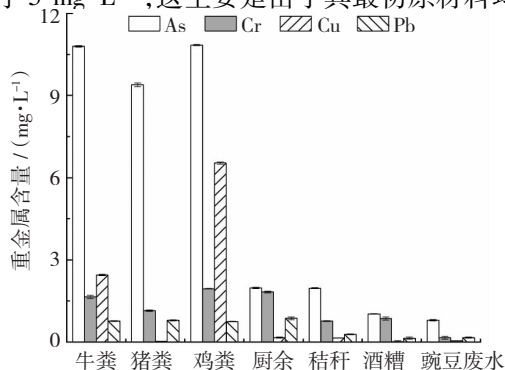


图5 不同有机废弃物源沼液中重金属含量

植物,本身含量较低,可能来自于大气沉降或重金属含量较高的土壤^[31]。

当沼液的重金属 *I* 值大于 1 时表明其具有环境风险^[32]。根据表 4 可以看出,所有沼液的重金属 *I* 值均低于 1,可以认为不具有污染风险。然而,土壤中的重金属会随沼液施用年限的增加而累积,且易与土壤中的羧基和羟基形成稳定的络合体,从而提高累积量^[33]。研究表明,长期(如 10 年)大量施用沼液可能会导致重金属 Cu 和 Cr 在农田土壤中累积量分别大于 80 mg·L⁻¹ 和 35 mg·L⁻¹^[34]。因此,在提升沼液养分的同时,需进一步钝化或消除重金属,提高沼液整体品质。此外,如长期大量施用沼液,仍需进行安全风险监测,以避免土壤环境重金属超标引起的食品安全风险。

2.2.2 沼液的抗生素含量及其环境风险评价

鸡粪和猪粪沼液的抗生素含量整体高于其他原料的沼液(图 6)。这主要是因为家禽和生猪舍饲养过程,通常过量使用抗生素,防止密集养殖引起的动物疾病,造成大量的抗生素随畜禽粪尿排出(70% ~ 90%),且在厌氧发酵过程无法有效降解^[6,35-36]。在所检测的 17 种常见抗生素中,属于四

表 4 不同有机废弃物源沼液重金属污染程度安全性评估

不同沼液	重金属种类		
	As	Cr	Pb
猪粪	0.027	0.002	0.008
牛粪	0.031	0.002	0.008
鸡粪	0.031	0.003	0.007
厨余	0.028	0.003	0.009
秸秆	0.027	0.003	0.008
酒糟	0.029	0.003	0.008
豌豆废水	0.002	0.002	0.008

环素类的金霉素和林可霉素以及磺胺类的磺胺二甲基嘧啶、磺胺嘧啶、磺胺间甲氧嘧啶的含量较高。韩静磊^[37]等研究也发现,猪场沼液的四环素类和磺胺类的含量明显高于其他种类的抗生素,含量分别达 18.2 ~ 99.6 μg·L⁻¹ 和 3.4 ~ 24.5 μg·L⁻¹。Chen^[38]等调研 3 个养殖场发现,猪粪沼液抗生素总浓度最高为 279 μg·L⁻¹,特别是林可霉素、磺胺甲氧嘧啶和磺胺氯哒嗪的浓度分别可达到 19.6、45 和 92 μg·L⁻¹。相比较之下,酒糟、秸秆和豌豆废水等作物源的废弃物沼液抗生素含量明显较低。

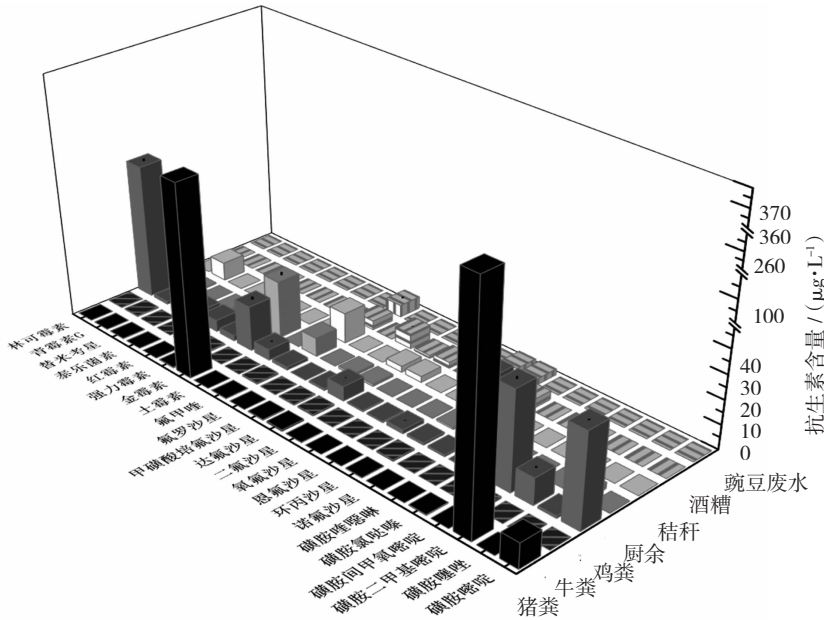


图 6 不同有机废弃物源沼液中抗生素含量

从表 5 可见,通过单因子污染指数法分析计算可知,所有沼液的抗生素 *I* 值均低于 1。从污染程度安全性评估角度,可以认为所有沼液的抗生素均不具有污染风险^[32]。沼液农田施用过程,土壤微生物会一定程度降解抗生素^[39],但是长期农田施用,可

能会造成难降解抗生素的累积^[40]。Liu^[41]等研究发现,在施用 5 年的猪粪沼液土壤中磺胺嘧啶、磺胺间甲氧嘧啶和土霉素等 13 种抗生素的累积并不明显,均低于 30 μg·kg⁻¹。然而,王小彬^[34]等在连续 6 年施用畜禽粪便沼液的土壤中检出了四环素、喹诺酮

类抗生素含量超过国际兽药协调委员会规定的土壤中抗生素残留允许限量($\leq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。因此,在沼液处理利用过程,亟需有效削减抗生素等污染

物的赋存,并进一步监测其在土壤中的降解转化规律,保障沼液资源化安全利用^[42]。

表5 不同有机废弃物源沼液抗生素污染程度安全性评估

抗生素	不同沼液						
	猪粪	牛粪	鸡粪	厨余	秸秆	酒糟	豌豆废水
磺胺类	0.757	0.002	0.266	0.006	0	0	0
四环素类	0.534	0.001	0.375	0.052	0	0	0

3 结论

通过分析不同有机废弃物源沼液的养分含量和风险污染物赋存,系统评判不同有机废弃物源的沼液肥料化利用的潜力。主要获得以下结论:

(1)尽管不同沼液的无机养分含量差异较大,但整体呈现 $\text{TN} > \text{TK} > \text{TP}$ 的趋势, $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ 总养分含量为 $1.2 \sim 11.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,中微量元素含量仅为 $84 \sim 2294 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,远低于相关液态肥料标准($2 \sim 30 \text{ g}$)。然而,鸡粪沼液不仅养分较均衡,还富含氨基酸($9.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),明显高于其他原料的沼液。

(2)不同有机废弃物源沼液中虽然检测出多种重金属和抗生素,特别是畜禽粪便原料的沼液整体含有较高的 As($9.2 \sim 10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),猪粪沼液中磺胺类抗生素含量较高($367.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),但污染程度安全性评估风险系数均小于1,认为其不具有环境风险,但在沼液处理利用过程中仍需有效控制抗生素和重金属等污染物残留,进一步保障沼液资源化安全利用。

参考文献:

- [1] 范小芳,康鹏洲,王晓辉,等. 沼液资源化利用混凝-絮凝处理技术研究进展[J]. 中国沼气, 2021, 39(6): 46-54.
- [2] 徐铭泽,孙丽英,张良,等. 沼液与化肥配施对西红柿生长和土壤组分的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(06): 75-82.
- [3] 巩明明. 沼液对旱作区土壤养分和玉米产量品质影响试验研究[J]. 中国沼气, 2017, 35(05): 62-64.
- [4] Barampouti E M, Mai S, Malamis D, et al. Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020;134110379.
- [5] Sobhi M, Guo J B, Gaballah M S, et al. Selecting the optimal nutrients recovery application for a biogas slurry based on its characteristics and the local environmental conditions: A critical review[J]. Science of The Total Environment, 2022, 814152700.
- [6] XU Z C, SONG X Y, LI Y, et al. Removal of antibiotics by sequencing-batch membrane bioreactor for swine wastewater treatment[J]. Science of The Total Environment, 2019;68423-30.
- [7] ZHANG Z Y, JILILI A, JIANG F Q. Heavy metal contamination, sources, and pollution assessment of surface water in the Tianshan Mountains of China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2).
- [8] 刘柏林,于雪荣,赵紫微,等. 7种杂豆营养成分含量分析及营养评价[J]. 安徽预防医学杂志, 2020, 26(04): 270-276.
- [9] 陈芬,张红丽,余高. 几种畜禽粪便厌氧发酵前后氮含量的变化[J]. 农业与技术, 2021, 41(07): 15-17.
- [10] 陈纯秀,陈胜文,谭耀文. 玉米秸秆好氧发酵沼液营养成分变化研究[J]. 现代农业科技, 2021, (06): 166-168.
- [11] 黄继川,彭智平,徐培智,等. 华南区域秸秆和畜禽粪便有机钾资源调查分析[J]. 广东农业科学, 2017, 44(04): 83-89.
- [12] 唐茂妍,池树宏,吴海坤,等. 二甲酸钾的应用及其替代抗生素的研究进展[J]. 饲料博览, 2020(01): 33-36.
- [13] 倪中应,叶永青,徐立军,等. 畜禽粪便中钾的有效性及其在土壤中的释放特点[J]. 农学学报, 2016, 6(01): 88-91.
- [14] MASSE D I, CATA SAADY N M, GILBERT Y. Potential of Biological Processes to Eliminate Antibiotics in Live-stock Manure: An Overview[J]. Animals, 2014, 4(2): 146-163.
- [15] 杨晓磊,朱恩,王站付. 上海餐厨有机废弃物成分分析和资源化利用初探[J]. 园林, 2020, (06): 8-13.
- [16] 张云,文勇立,王永,等. 养殖场沼液重金属元素的 ICP-OES 测定[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),

- 2014, 40(01): 24–26.
- [17] 郭志刚, 胡山鹰, 金涌, 等. 豌豆均衡营养肥对豌豆产量及品质的影响[J]. 肥料与健康, 2020, 47(05): 18–23.
- [18] 刘敏, 孙广文, 张海涛, 等. 豌豆和豌豆副产品的营养特性及其在动物饲料中的应用[J]. 湖南饲料, 2021, (02): 40–45.
- [19] 董颐玮, 梁栋, 李丹阳, 等. 沼液主要养分含量特征分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(05): 1206–1214.
- [20] 胡志强, 李存福, 张国顺, 等. 白酒酒糟综合利用技术研究进展[J]. 山东化工, 2019, 48(15): 76–78.
- [21] 付善飞, 许晓晖, 师晓爽, 等. 酒糟沼气化利用的基础研发[J]. 化工学报, 2014, 65(05): 1913–1919.
- [22] 奚姗姗, 刘海林, 黄健, 等. 钙镁离子对垃圾渗滤液处理中微生物降解有机物的作用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(07): 189–196.
- [23] 杨琳芬, 李勇, 吴科盛. 微波消解—电感耦合等离子体质谱法测定猪粪中铁铜锰锌钙等8种元素含量[J]. 农产品质量与安全, 2019(2): 53–56.
- [24] 邵一奇, 王电站, 颜成, 等. 厌氧消化对猪场废水中溶解性和颗粒态有机物的组成与性质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(04): 713–720.
- [25] 徐先洲, 祝苑, 胡瑞, 等. 鸡粪发酵液中总游离氨基酸的粗提取及茚三酮法检测[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(11): 195–198.
- [26] 李贤柏, 周开孝. 鸡粪发酵过程中氨基酸的重建[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 1998(02): 41–44.
- [27] URDANETA RINCON M, LEESON S. Muscle (pectoralis major) protein turnover in young broiler chickens fed graded levels of lysine and crude protein[J]. Poult Sci, 2004, 83(11): 1897–1903.
- [28] YANG A Q, ZHANG G M, MENG F, et al. Enhancing protein to extremely high content in photosynthetic bacteria during biogas slurry treatment[J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 1277–1281.
- [29] 卢信, 罗佳, 高岩, 等. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(03): 671–681.
- [30] 田一郎. 鸡饲料中铬的营养价值及应用研究[J]. 畜禽业, 2020, 31(12): 61–62.
- [31] 孙蓓蓓, 刘研萍, 张继方. 不同种类沼液浸种对生菜种子萌发的影响[J]. 种子, 2021, 40(04): 43–50.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 畜禽场环境质量评价准则: GB/T 19525.2–2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [33] 冯露, 李富程, 蔡敏, 等. 沼液施用年限对土壤团聚体、养分及重金属的影响[J]. 广东农业科学, 2021, 48(03): 81–88.
- [34] 王小彬, 闫湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农环用之环境安全风险[J]. 中国农业科学, 2021, 54(01): 110–139.
- [35] PEREZ BIBBINS B, TORRADO AGRASAR A, SALGADO J M, et al. Potential of lees from wine, beer and cider manufacturing as a source of economic nutrients: An overview[J]. Waste Management, 2015, 40: 72–81.
- [36] LOU Y Y, YE X, YE Z L, et al. Occurrence and ecological risks of veterinary antibiotics in struvite recovered from swine wastewater[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 678–685.
- [37] 韩静磊, 贺德春, 王志良, 等. 规模化养殖场废水中抗生素种类及残留特征研究[J]. 广州化学, 2012, 37(01): 27–31.
- [38] CHEN J, LIU Y S, ZHANG J N, et al. Removal of antibiotics from piggery wastewater by biological aerated filter system: Treatment efficiency and biodegradation kinetics[J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 70–77.
- [39] 何玉洁, 周凯萍, 饶怡璇, 等. 土壤中抗生素的环境风险及污染土壤的生物修复技术[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3487–3504.
- [40] 宋英今, 王冠超, 李然, 等. 沼液处理方式及资源化研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 237–250.
- [41] LIU C, CHEN Y X, LI X H, et al. Temporal effects of repeated application of biogas slurry on soil antibiotic resistance genes and their potential bacterial hosts[J]. Environmental Pollution, 2020, 258: 113652.
- [42] YUAN Q B, ZHAI Y F, MAO B Y, et al. Antibiotic resistance genes and intI1 prevalence in a swine wastewater treatment plant and correlation with metal resistance, bacterial community and wastewater parameters[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 251–259.