

餐厨沼液对农作物种子发芽和生长影响

王海潮*, 郑晓伟*, 郭栋, 刘丹, 李珊, 姚晶晶
(北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京 100089)

摘要: 餐厨沼液直接施用到农田会对植物产生一定损害。考察了餐厨垃圾厌氧发酵沼液贮存过程的理化性质变化, 探究了贮存时间和稀释倍数对不同作物种子生长指标的影响, 以期为沼液的农业安全应用提供数据支撑。选取小白菜、番茄、黄瓜和小麦种子作为供试植物, 进一步研究不同贮存时间沼液对作物生长指标的影响。结果表明, 随贮存时间的延长, 沼液 pH 值、电导率和氨氮浓度均呈逐渐增加的趋势, 与此相反, SCOD、总氮、总磷和 VFAs 均呈逐渐降低的趋势, 而重金属含量、氨基酸、植物生长激素和腐殖质相对比较稳定。贮存时间对种子发芽率和根芽生长影响较小, 小白菜、番茄和小麦种子最适芽生长的浓度为 2%, 而黄瓜种子最适芽生长浓度为 6%, 通过根芽比发现餐厨沼液对黄瓜种子根的生长抑制作用较为明显。进一步结合 Spearman 相关性分析发现, 种子根芽生长与 SCOD、总氮、VFAs 呈正相关, pH 值、电导率、氨氮浓度可能抑制了根和芽的生长。因此, 针对餐厨沼液的贮存和回用问题, 应适当处理并稀释后进行使用, 可对植物的生长起到促进作用。

关键词: 餐厨沼液; 贮存时间; 种子发芽率; 根芽比; 相关性分析

中图分类号: S216.4; X703; X705 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)04-0042-08

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022040042

Effect on Germination and Growth of Crop Seeds of Biogas Slurry from Kitchen Waste / WANG Haichao*, ZHENG Xiaowei*, GUO Dong, LIU Dan, LI Shan, YAO Jingjing / (Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100089, China)

Abstract: Direct application of kitchen biogas slurry to the farmland will cause certain damage to plants. This study investigated the physical and chemical properties of biogas slurry during the storage process for kitchen waste, and the effects of storage time and dilution ratio on seed growth indicators of different crops were explored, in order to provide data support for the agricultural safety application of biogas slurry. We further explored the effects of biogas slurry at different storage times on crop growth indexes, and selected cabbage, tomato, cucumber and wheat seeds as test plants. The results showed that pH, conductivity and ammonia concentration of biogas slurry increased, but SCOD, total nitrogen, total phosphorus and VFAs decreased in a time-dependent manner, and heavy metal content, amino acid, plant growth hormone and humus were relatively stable. Storage time had little effect on the seed germination rate and root or bud growth. The optimal bud growth concentration of cabbage, tomato and wheat seeds was 2%, while the optimal bud growth concentration of cucumber seeds was 6%, and it was found that biogas slurry was significantly inhibited the growth of cucumber seeds according to the root bud ratio. Furthermore, Spearman correlation analysis showed that root and bud growth of seeds was positively correlated with SCOD, TN, TP and VFAs, However, pH, electrical conductivity and ammonia nitrogen concentration might inhibit root and bud growth. Therefore, proper treatment and dilution of kitchen biogas slurry before use may have potential promote value for plants growth.

Key words: kitchen biogas slurry; storage time; seed germination rate; root bud ratio; correlation analysis

餐厨垃圾作为一种典型的城市有机固体废弃物, 由于其数量大、有机物含量高、生物降解性好等特点, 造成了严重的环境污染, 引起了各国政府和研

究人员的广泛关注^[1-2]。由于餐厨垃圾厌氧发酵的资源化程度高, 已成为目前国内餐厨垃圾处置的主流技术^[3]。然而, 厌氧发酵产生的沼液, 具有污染

收稿日期: 2021-11-22 修回日期: 2021-12-28

项目来源: 农业高质量发展共性技术攻关专项(20327302D)

作者简介: 王海潮(1989-)男, 汉族, 博士研究生, 主要研究方向为固体废弃物处理与资源化利用, E-mail: wanghaichao9501@163.com

通信作者: 王海潮, E-mail: wanghaichao9501@163.com; 郑晓伟, E-mail: liepi_zxw@163.com

成分复杂、浓度高等特点^[4],且沼液碳氮比失调,生化性能下降,进一步加大了沼液的处理难度^[5]。厌氧过程产生大量的沼液,远远超出农业施用规律的消纳需求。因此,沼液的后续贮存和应用成为人们关注的重点。大量的研究表明,沼液富含大量的营养元素、生理活性物质和微量矿物质元素,具有一定的肥效作用^[6-7]。将沼液作为农业有机肥返回土壤被认为是一种合理选择,可以减少矿物肥料的使用,对农业和环境具有多种好处^[8]。但这带来了重金属污染、有害气体排放、土地盐碱化、抗生素风险和致命病原体等问题^[9]。目前针对畜禽粪污和作物秸秆等贮存过程中的养分和理化性状的变化研究均有报道^[10-11],但是对餐厨沼液贮存变化特征未见相关报道。本研究以餐厨沼液为对象,系统分析了沼液的成分含量,并考察了其对不同农作物种子发芽和生长的影响,以期为餐厨厌氧沼液的农用安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 沼液的采集

本研究所用的沼液取自北京市顺义区陈各庄村沼气服务站,该沼液以餐厨垃圾为原料进行厌氧发酵,进料浓度为12%~13%,发酵过程中采用中温(35℃~38℃)发酵,发酵时间为正常产气60 d,充分发酵后的沼液离心过滤,收集后常温密闭并遮光储存在50 L塑料桶中。沼液贮存时间分别为1周(1 W)、1月(1 M)、3月(3 M)和6月(6 M)后取样,取样后的样品存储在4℃冰箱中,并进行相关实验,实验地点为北京市科学技术研究院资源环境研究所。

1.2 沼液的理化性质测定

1.2.1 基础理化指标测定

基础理化指标测定包括pH值、电导率、可溶性化学需氧量(SCOD)、总氮、总磷、总钾、氨氮、VFAs。pH值的测量采用数字pH计(雷磁PHSJ-4F,中国上海);电导率的测量采用数显电导率仪(力辰LC-EC-2S,中国上海);SCOD、总氮、总磷、氨氮均采用紫外-可见分光光度计(哈希DR6000,美国)测定;总钾含量根据国家标准GB/T20975.33-2020采用火焰原子吸收光谱法测定;挥发性脂肪酸(VFAs)的采用滴定法,参见Q/YZJ10-03-02-2000。

1.2.2 重金属含量测定

重金属含量测定包含汞(Hg)、砷(As)、铬

(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)。采用ICP-MS(Agilent 7800),泵速29 r·min⁻¹,雾化器流量0.86 L·min⁻¹,辅助气体0.7 L·min⁻¹,样品冲洗时间40 s,射频功率1300 W。

1.2.3 氨基酸含量和植物激素测定

采用液相质谱联用仪(SHIMADZU-LCMS-8050,日本)测定。液相色谱条件:色谱柱(50 mm×2.1 mm,2.1 μm),色谱柱温为30℃,流动相为甲醇-水(80:20),流速为0.50 mL·min⁻¹,检测波长分别为254 nm和200 nm;质谱条件:离子源温度:230℃,离子化能量为70 eV,接口温度为280℃,扫描范围:m/z 80-1000,ESI正离子模式检测。

1.2.4 腐植酸的测定

本方法用焦磷酸钠碱液从腐植酸有机肥中抽提腐植酸,再在强酸性溶液条件下,用重铬酸钾对其进行氧化。根据试样氧化前后重铬酸钾消耗量折算成含碳量百分比,经过碳系数的换算来表示腐植酸的含量,参考行业标准NY/T-2010。

1.3 实验对象

受试种子:小白菜、番茄、小麦、小黄瓜(采购于河北某种子销售有限公司,发芽率≥85%)

1.4 沼液对种子萌发和生长影响实验

选择90粒饱满的小白菜种子,去离子水清洗干净,用滤纸吸收表面水分备用。用直径90 mm的一次性平板,铺2层滤纸作为发芽床,在每个平板上均匀放置30粒种子。将不同贮存时间(1 W、1 M、3 M、6 M)的餐厨沼液经3层纱布过滤后逐级稀释,稀释度分别为1%、2%、4%、6%、8%、10%,设置去离子水处理组作为对照组(CK)。每个处理设置3个平行处理,置于培养皿中,放置25℃光照培养箱(一恒LRH-70,中国上海)中进行发芽试验(光照12 h·d⁻¹)。25℃恒温箱中培养。根据滤纸在板内的湿度,每天用相应浓度的沼液湿润滤纸。培养1周后,根据萌发情况统计发芽率,并测量其根长和茎长。贮存沼液对不同种子发芽生长的影响,选用的贮存6月后的沼液,同时处理各类种子,实验条件与上述相同。7天后从培养皿中取出幼苗,计算种子发芽率。采用高精度电子数显游标卡尺(0~150 mm)测定芽长、根长,并计算根芽比:

$$\text{种子发芽率} = \frac{\text{正常发芽粒数}}{\text{供试种子粒数}} \times 100\%;$$

$$\text{根芽比} = \frac{\text{发芽种子根长}}{\text{发芽种子芽长}}$$

1.5 统计分析

所有实验均至少重复 3 次,理化数据、发芽率、根长、芽长和根芽比计算均利用 Excel 2013 统计分析,结果以均数 \pm 标准差表示。环境因子与种子发芽生长的 Spearman 相关系数采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,利用 GraphPad Prism 8.0 绘制柱形图表达统计结果。

2 结果与分析

2.1 不同贮存时间下餐厨沼液理化性质和生物活性变化

为确定贮存时间对餐厨沼液理化性质的影响,分别对不同贮存时间餐厨沼液进行定期取样,测定其 pH 值、电导率、SCOD、总氮、总磷、总钾、氨氮、VFAs 及重金属等理化指标(如表 1 所示)。结果表明,pH 值在 7.27 ~ 8.87 范围内,贮存期间 pH 值呈弱碱性;电导率范围在 14.62 ~ 17.66 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之

间;氨氮范围在 1137.33 ~ 2301.67 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,随着贮存时间延长,沼液 pH 值、电导率和氨氮浓度均呈逐渐增加的趋势。餐厨垃圾中蛋白质含量较高,蛋白质经过生物降解后会转化为氨氮^[12]。因此随着贮存时间延长,餐厨底物厌氧消化得越充分,氨氮含量越高。与此相反,沼液的其他理化性质,如 SCOD、总氮、总磷和 VFAs,则随着贮存时间延长,呈现浓度逐渐降低的趋势。SCOD 用于表示餐厨沼液中可溶性有机物含量,反映了消化底物的可生化性和处理程度,由此可知随着贮存时间的延长,餐厨底物厌氧消化得越充分。此外,我们还检测了餐厨沼液中重金属的含量,依据《城镇垃圾农用控制标准》,餐厨沼液除了 Hg 含量(0.28 ~ 0.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)未超标外,其余检测的重金属均超出农用标准,因此不能直接施用。随着贮存时间的增加,重金属含量并未有明显变化,餐厨垃圾沼液农用过程中,可能存在高重金属元素积累等问题。

表 1 餐厨垃圾沼液的理化成分

理化指标	CK	M1	M2	M6
pH 值	7.27 \pm 0.21	7.5 \pm 0.1	8.2 \pm 0.23	8.87 \pm 0.25
电导率/($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	14.62 \pm 0.44	15.23 \pm 0.91	16.9 \pm 0.2	17.66 \pm 0.4
SCOD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	12419.67 \pm 529.29	9404 \pm 474.6	6695.33 \pm 604.99	5188.33 \pm 774.78
总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	2952.33 \pm 65.31	2858.67 \pm 49.17	2666.33 \pm 57.38	2594 \pm 30.12
总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	53.67 \pm 9.71	48.67 \pm 4.93	41 \pm 4	32.67 \pm 3.51
总钾/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	788.67 \pm 34.5	836 \pm 13.08	832.33 \pm 18.77	831.91 \pm 17.07
氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1137.33 \pm 57.77	1430 \pm 29.21	1933.67 \pm 60.22	2301.67 \pm 56.96
VFAs/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	8525.67 \pm 111.28	6149 \pm 108.26	3586.33 \pm 154.61	2152.67 \pm 154.11
As/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	33.58 \pm 2.41	34.43 \pm 1.37	35.86 \pm 3.5	37.27 \pm 1.71
Hg/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.28 \pm 0.07	0.32 \pm 0.07	0.61 \pm 0.21	0.47 \pm 0.05
Pb/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	112.12 \pm 8.95	130.07 \pm 13.42	125.48 \pm 32.16	120 \pm 3.3
Cr/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	465.64 \pm 94.24	431.3 \pm 114.77	386.9 \pm 162.73	373.68 \pm 20.48
Cd/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	6.73 \pm 0.51	7.29 \pm 0.1	7.15 \pm 0.2	7.19 \pm 0.36

沼液中除了包含上述物理化学指标,还包含许多氨基酸、少量植物生长激素和腐殖质等生物活性物质^[13]。氨基酸能够壮苗、健株,增强作物的抗逆性能,对植物新陈代谢起着重要作用。笔者通过 LC-MS 检测了 17 种氨基酸,检测出来 10 种氨基酸包含缬氨酸(Val)、酪氨酸(Tyr)、脯氨酸(Pro)、苯丙氨酸(Phe)、赖氨酸(Lys)、亮氨酸(Leu)、异亮氨酸(Ile)、谷氨酸(Glu)、天门冬氨酸(Asp),含量较高的氨基酸有组氨酸(His)和谷氨酸(Glu)含量较高,分别可达 70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,而且贮

存时间对其影响较小。同时本研究检测了部分植物生长激素包含赤霉素(GAs)、吲哚乙酸(IAA)和脱落酸类(ABA),其中只检测到了 GA4、GA7 和 IAA,而赤霉素 GA7 含量较高,平均浓度可达 32.96 ~ 60.66 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并且随着贮存时间的延长,赤霉素 GA7 的含量持续降低。且具有促进衰老和抑制植物生长作用的脱落酸(ABA)未检出。除此之外,笔者还检测了沼液中腐殖质的含量,根据腐殖质在酸性水溶液中的溶解度的不同,可将其分为胡敏素(HM)、胡敏酸(HA)和富里酸(FA),后二者合称腐

殖酸^[14]。如表 2 所示贮存时间对腐殖质的含量变化影响较小。

表 2 餐厨垃圾沼液的生物活性成分

活性指标	CK	M1	M2	M6
Val / (mg·L ⁻¹)	0.62 ± 0.19	0.41 ± 0.2	0.25 ± 0.18	0.32 ± 0.25
Tyr / (mg·L ⁻¹)	0.42 ± 0.21	0.5 ± 0.07	0.28 ± 0.09	0.31 ± 0.13
Pro / (mg·L ⁻¹)	0.47 ± 0.27	0.48 ± 0.3	0.26 ± 0.06	0.27 ± 0.19
Phe / (mg·L ⁻¹)	0.35 ± 0.11	0.45 ± 0.22	0.26 ± 0.28	0.38 ± 0.07
Lys / (mg·L ⁻¹)	0.55 ± 0.09	0.6 ± 0.05	0.52 ± 0.23	0.27 ± 0.08
Leu / (mg·L ⁻¹)	0.63 ± 0.16	0.45 ± 0.22	0.49 ± 0.1	0.49 ± 0.11
Ile / (mg·L ⁻¹)	0.41 ± 0.26	0.3 ± 0.1	0.46 ± 0.18	0.55 ± 0.12
His / (mg·L ⁻¹)	72.78 ± 6.97	73.11 ± 7.71	75.73 ± 1.65	78.25 ± 10.61
Glu / (mg·L ⁻¹)	10.92 ± 8.51	10.3 ± 4.28	12.12 ± 6.82	14.51 ± 2.51
Asp / (mg·L ⁻¹)	0.95 ± 0.55	0.52 ± 0.27	0.47 ± 0.23	0.41 ± 0.06
GA4 / (mg·L ⁻¹)	0.41 ± 0.48	0.25 ± 0.18	0.34 ± 0.22	0.35 ± 0.31
GA7 / (mg·L ⁻¹)	60.66 ± 9.58	58.72 ± 16.28	38.56 ± 34.9	32.96 ± 14.26
IAA / (mg·L ⁻¹)	1.32 ± 1.69	0.45 ± 0.28	0.37 ± 0.05	0.31 ± 0.2
HM / (mg·kg ⁻¹)	1076.91 ± 3.76	1070.39 ± 83.92	1058.02 ± 30.23	1102.11 ± 68.13
HA / (mg·kg ⁻¹)	1138.32 ± 16.85	1087.71 ± 2.49	1112.84 ± 49.37	1057.21 ± 44.15
FA / (mg·kg ⁻¹)	1150.22 ± 19.16	1123.4 ± 51.16	1086 ± 41.63	1059.68 ± 71.03

2.2 贮存沼液对小白菜发芽生长的影响

针对不同贮存时间的餐厨沼液,选用小白菜种子作为研究对象,分别观察种子的发芽率、根长、芽长和根茎比,以考察沼液对种子发芽及不同部位生长的影响。由图 1 可知,对比不含沼液的空白组 (CK) 不同稀释度的沼液均抑制小白菜种子的发芽,沼液浓度越大对种子发芽的抑制作用越明显。由图 2 可知,不同浓度的餐厨沼液对小白菜生根的作用不同,当沼液浓度较低 (1% 和 2%) 时,沼液可促进小白菜根部的生长,随着沼液浓度加大,表现出抑制根部生长的作用。并且贮存时间对根部生长也存在抑制现象,贮存一周时间的沼液对根部生长的促进作用最佳。由图 3 可知,餐厨沼液对芽的生长也存在相似的作用。进一步,通过计算种子生长的根芽比,反映沼液对不同生长部位的刺激作用,如图 4 所示,沼液在低于 6% 的浓度下,对根和芽的作用刺激几乎相同,随着浓度的升高,沼液对芽生长抑制作用更为明显。综合不同贮存时间的沼液对小白菜种子根、芽和根茎比的分析,发现可促进生长的浓度范围下,贮存时间对种子生长的影响较小。

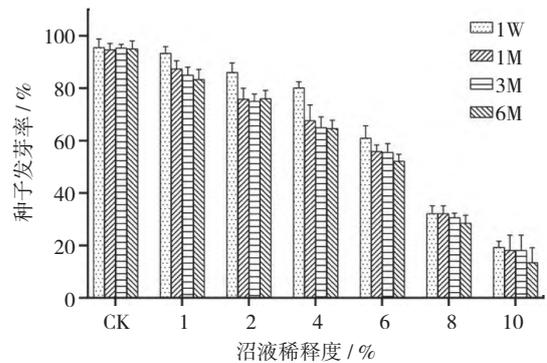


图 1 贮存沼液对小白菜种子发芽率影响

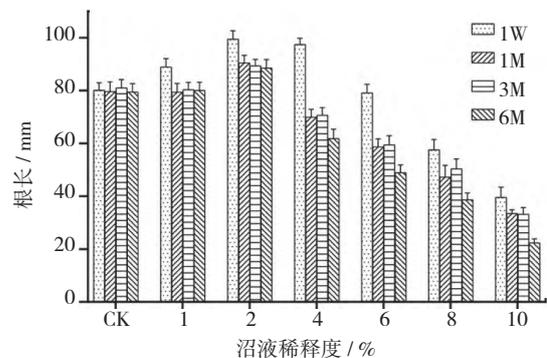


图 2 贮存沼液对小白菜根长的影响

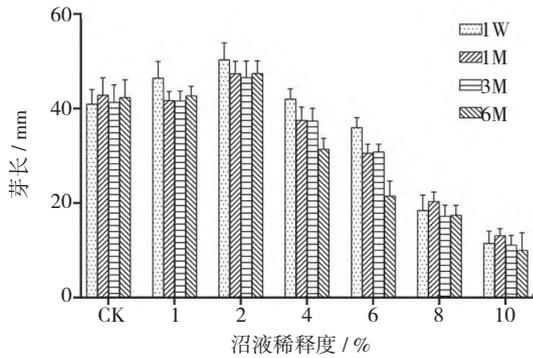


图3 贮存沼液对小白菜芽长的影响

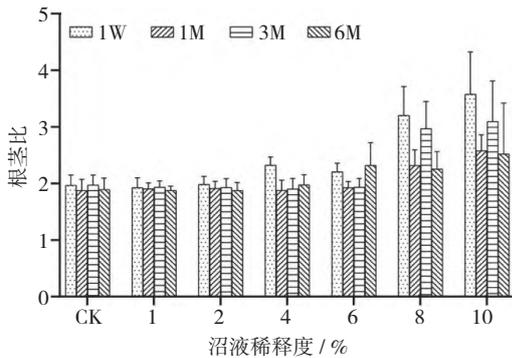


图4 贮存沼液对小白菜根茎比的影响

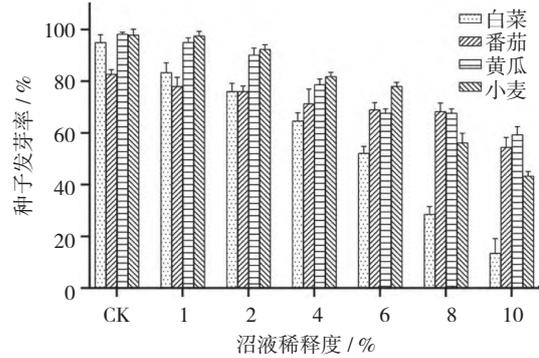


图5 贮存沼液对不同种子发芽率的影响

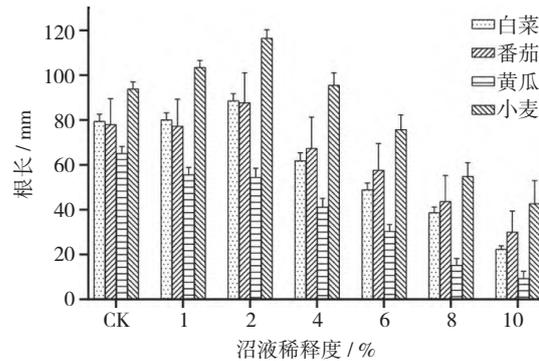


图6 贮存沼液对不同种子根长的影响

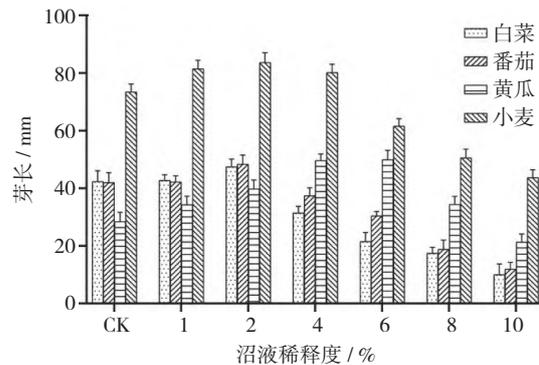


图7 贮存沼液对不同种子芽长的影响

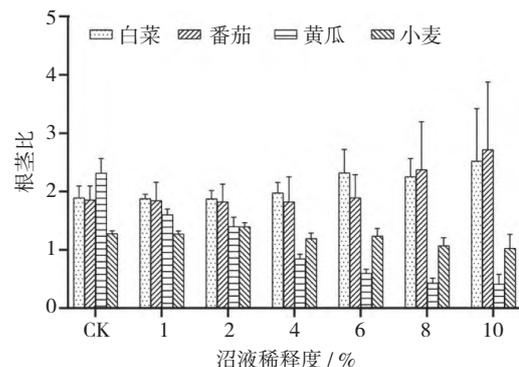


图8 贮存沼液对不同种子根茎比的影响

2.3 贮存沼液对不同种子发芽生长的影响

进一步 笔者针对不同的农作物种子进行了类比 根据文献报道 粮食作物对氮肥比较敏感、蔬菜作物除需要较多的 N、P、K 元素 还需补充中微量元素。白菜属叶菜类,番茄和黄瓜属非叶菜类,小麦属于典型的粮食作物,它们在生长过程中所需的营养特点和施肥方面具有代表性,对不同环境的抗逆性也不同^[15]。本研究分别观察了小白菜、番茄、黄瓜和小麦种子的发芽率、根长、芽长和根茎比,以考察贮存沼液对不同作物的影响差别。由图 5 可知,不同种子在相同浓度的沼液中发芽率不同,沼液浓度增加抑制种子的发芽生长,小白菜对沼液浓度更为敏感,抑制作用更加明显。由图 6 可知,随着沼液浓度的增加,小白菜、番茄和小麦种子的根部出现先促进后抑制的生长现象,而黄瓜种子与空白组对照相比,均呈现抑制生长现象。进一步分析贮存沼液对芽的生长影响,发现所有作物种子的芽均呈现先促进后抑制的生长现象,然而,每类种子促进芽生长的最适浓度不同,小白菜、番茄和小麦种子的最适浓度为 2%,而黄瓜种子最适芽生长浓度为 6%。最后,通过计算种子生长的根芽比,如图 8 所示,发现贮存对小白菜和番茄种子的影响相似,低于 6% 的浓度

下,对根和芽的作用刺激几乎相同,随着浓度的升高,沼液对芽的抑制作用更为明显。对于小麦种子根和芽的影响较为同步,而对于黄瓜种子来说,沼液浓度增加对根的抑制作用更为明显。

2.4 餐厨沼液对种子发芽生长的影响因素分析

由图1~图8可知,较高浓度的贮存沼液抑制种子的发芽和生长,而稀释一定程度的沼液对生长产生一定的促进作用,包括贮存时间对种子的发芽和生长也能产生一定的影响。对于变量之间的相关关系,进行相关系数计算是一种有效的考察方式^[16]。因此笔者基于小白菜的发芽和生长数据和对应的餐厨沼液理化数据,进行了 Spearman 相关性

分析,从而得到与环境因子相关的种子发芽和生长信息。表3中反映了不同理化指标与发芽生长值间的 Spearman 相关系数,通过表中可以看出,种子的发芽率与各理化因子之间相关性都不高,而根和芽的生长与 SCOD、总氮、VFAs 呈正相关,且相关系数较高。而与 pH 值、电导率、氨氮浓度呈负相关,可能抑制了根和芽的生长。其中根芽生长与 VFAs 之间的相关系数均大于 0.90,相关系数非常高,而且 p 都小于 0.01,呈现显著正相关,VFAs 可能是促进根芽生长的主要因素。而氨氮浓度与根芽生长在 0.01 水平上都十分显著的负相关,相关系数均小于 -0.88,因此氨氮可能是抑制根芽生长的主要因素。

表3 环境因子与种子发芽生长的 Spearman 相关系数分析

项目	p 值			相关系数(R 值)		
	发芽率	根长度	芽长度	发芽率	根长度	芽长度
pH 值	0.244696	0.004916	0.022115	-0.60633	-0.875**	-0.81063*
电导率	0.405522	0.002405	0.007957	-0.49649	-0.89807**	-0.85515
SCOD	0.081515	0.000785	0.005906	0.73205	0.92983**	0.867759**
总氮	0.087565	0.000256	0.004916	0.725045	0.957901**	0.874814**
总磷	0.149192	0.010328	0.07499	0.677258	0.844528**	0.742452
总钾	0.649744	0.495409	0.400539	-0.27671	-0.42106	-0.50796
氨氮	0.147353	0.001128	0.003757	-0.67951	-0.9193**	-0.8854**
VFAs	0.177082	0.001431	0.001805	0.658495	0.912286**	0.906561**

注: $p < 0.01$ (**) 水平(双侧)上极显著相关, $p < 0.05$ (*) 水平(双侧)上显著相关;相关性系数 $R > 0$ 为正相关性, $R < 0$ 为负相关性。

3 讨论

3.1 贮存时间对餐厨沼液理化性质和生物活性的影响

本研究将餐厨沼液贮存时间分为4个阶段,最短1周,最长时间为半年。理化参数的变化,表明餐厨沼液随着贮存时间延长,沼液 pH 值、电导率和氨氮浓度均呈逐渐增加的趋势。这一结果与刘敬^[17]等和对抗生素菌渣厌氧发酵沼液贮存6个月内 pH 值和电导率呈上升趋势结论一致。随着 pH 值增加,提高了 OH^- 的迁移率,从而提高离子电导率^[18]。刘玉庆^[11]等人研究了不同贮存条件下氨氮含量的变化,发现当温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$,遮光厌氧条件贮存下20天时,氨氮含量升高,达 $902.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增加了10%。以上结果与本研究结果趋势基本一致,至于上升幅度略有不同,很可能是发酵原料及发酵条件的差异造成的。贮存沼液 pH 值呈碱性且氨氮含量升高,说明沼液中存在大量的氨分子。有研究表明,水体中氨氮浓度超过 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,则会对苦草

种子的萌发和幼苗的生长产生一定抑制作用^[19]。而根据本研究结果,密封贮存6个月的餐厨沼液中的氨氮浓度可超过 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远远超出适合种子发芽生长的浓度,应采取相应的物理化学方法降低氨氮浓度才能使用。

另一方面本研究发现餐厨沼液中 SCOD、总氮、总磷和 VFAs 随着贮存时间延长,呈现浓度逐渐降低的趋势。根据张丽萍^[10]等人研究发现,随着贮存时间的延长,28天后沼液的 TN 和 TP 含量分别能减少40%及35%以上,贮存过程中 COD 下降了69.97%以上,与本研究趋势一致,但其采用的发酵原料为新鲜猪粪,且发酵周期较短仅10天左右。另一项研究表明以抗生素菌渣为原料的厌氧发酵沼液,随贮存时间延长 VFA 和 SCOD 显著下降,均与本研究结果一致^[17]。目前我国还没有针对餐厨垃圾厌氧沼液中 SCOD 的排放标准,但根据畜禽养殖沼液的 COD 排放标准要求低于 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[20]。可以看出本研究中餐厨沼液 SCOD 均远高于此标准。因此,对于餐厨垃圾沼液来说必须要稀释处理后才

能排放或使用。此外,本研究考察了金属元素钾和重金属汞、砷、铬、铅、镉的含量,均不随贮存时间产生较大变化。特别是重金属是对生态环境风险较大的污染物,对其排放进行严格控制和管理。本研究贮存餐厨沼液中重金属含量,除了 Hg 含量外的重金属均已超标,虽然稀释使用可符合排放标准,但长期使用依然存在重金属元素积累等问题。

除此之外,本研究对贮存期间餐厨沼液中 17 种氨基酸、部分植物生长激素和腐殖质等生物活性物质的含量变化进行了全面分析。相似的研究表明鸡粪发酵沼液中精氨酸含量达到 $122.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,猪粪沼液中丙氨酸和甘氨酸含量较高,分别为 $27.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $24.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。苯丙氨酸和谷氨酸含量也可达 43.74 和 $47.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[21],而本研究发现餐厨沼液检测出的氨基酸种类和含量完全不同,含量较高的氨基酸为组氨酸(His)和谷氨酸(Glu),分别可达 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,而且贮存时间对其影响较小。因此,沼液发酵液的原材料不同,所产生沼液中的氨基酸的种类和含量也会存在差别。餐厨沼液中的植物激素与猪粪沼液检测出的种类几乎一致^[22],因其发酵工艺和发酵原料均不相同,其浓度含量相差较大。

3.2 餐厨沼液影响种子生根发芽的主要因素

众多周知,沼液中含有丰富的 N、P、K、有机质、腐殖质等营养元素,也包含许多促进植物生长的物质。既可以为植物提供所需的营养元素,也能改善植物的生长环境,增加农作物产量。传统上畜禽粪污沼液一直用作农业肥料,但是随着社会和经济的发展,越来越多的餐厨垃圾厌氧发酵工程投入使用,探索餐厨沼液的农业利用前景和潜在风险极为重要。Tigini^[4]等人发现猪粪消化液具有生态毒性,可能是由于铵、盐度、COD、磷酸盐含量高,并建议在使用消化液之前应考虑进行预处理,以减少生态毒性和环境影响。因此,餐厨沼液是否能够农田回用,其作为肥料的有效性仍在探索。

本研究首先探索了各类作物种子在餐厨贮存沼液中的发芽和生长情况,发现贮存沼液对不同种子的影响有所差别,总体上低浓度的沼液不影响种子的发芽,且能促进种子的根芽的生长,而高浓度的沼液则会抑制种子的发芽和芽的生长。与刘敬^[17]等人的研究结论一致,高浓度沼液显著抑制种子萌发、根和芽的生长。贮存 6 个月的沼液,稀释 60 倍以上解除抑制作用,并且在适宜浓度还显著促进种子萌

发、根、芽的生长。分析其原因,种子的发芽生长与所处的理化环境关系密不可分。餐厨沼液不同于其他发酵原料沼液,其含盐量较高。EC 值是用来测量溶液中可溶性盐浓度的,通常用来反映液体肥料或种植介质中的盐离子浓度^[24]。研究表明,保证植物生长的 EC 值应该在 $0.2 \sim 0.6 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内,餐厨沼液的电导率对种子发芽有很强的抑制作用,不能直接使用^[25]。本研究调查发现餐厨沼液的电导率范围在 $14.62 \sim 17.66 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$,极大地超出了适合植物生长的电导率范围,通过相关性分析也发现植物的根芽生长与电导率呈显著负相关。

通过本研究还发现氨氮浓度与根芽生长呈十分显著的负相关,密封贮存的餐厨沼液,随着贮存时间延长,氨氮浓度进一步升高。研究表明,水体中过高浓度的氨氮会对苦草产生毒害作用,而如苦草植株在室外实验条件下耐受的最大氨氮浓度为 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26],而餐厨沼液中的氨氮浓度远超过可使用浓度。其次,Ebner^[27]等人发现当沼液施入农田时,35% 的氨会以 NH_3 的形式挥发到空气中,造成空气污染。杨德坤^[28]等利用鸟粪石结晶法对餐厨沼液处理,使沼液的 COD/TN 提高约 8 倍,大大提高了沼液的可生化能力。综上所述,在一定浓度范围内餐厨沼液对种子发芽和生长具有促进作用。针对餐厨沼液过高的氨氮浓度问题,可进行适当处理后再进行使用。但沼液成分复杂,对种子作用的具体机制还有待于进一步研究。

4 结论

(1) 餐厨沼液随着贮存时间延长,沼液 pH 值、电导率和氨氮浓度均呈逐渐增加的趋势。与此相反,SCOD、总氮、总磷和 VFAs,则随着贮存时间延长,呈现浓度逐渐降低的趋势。重金属含量、氨基酸、植物生长激素和腐殖质无明显变化。

(2) 低浓度沼液可促进种子根部的生长,高浓度表现出抑制根部生长。贮存时间对小白菜种子根、芽生长的影响较小,贮存一周时间的沼液对根部生长的促进作用最佳。小白菜、番茄和小麦种子最适芽生长的浓度为 2%,而黄瓜种子最适芽生长浓度为 6%。沼液浓度增加对黄瓜种子根的生长抑制作用较为明显。

(3) 种子根芽生长与餐厨沼液中的 SCOD、总氮、VFAs 呈正相关,与 pH 值、电导率、氨氮浓度呈负相关,而发芽率与各理化因子之间相关性都不高。

参考文献:

- [1] Jin C, Sun S, Yang D, et al. Anaerobic digestion: An alternative resource treatment option for food waste in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 779: 146397.
- [2] Li L, Peng X, Wang X, et al. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability [J]. *Biore-source Technology* 2018, 248: 20–28.
- [3] 魏小凤, 孙伟伟, 王冠平, 等. 我国餐厨垃圾处理市场现状分析 [J]. *环境卫生工程* 2016, 24 (2): 3.
- [4] Tigrini 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.
- [5] 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 (05): 36–46.
- [6] 王嘉鑫, 黄青, 赵小芳, 等. 沼液在水稻生产中的资源化利用及效益综述 [J]. *湖南农业科学* 2019, No. 408 (09): 122–126.
- [7] 李辉, 黄乐红, 黄梅, 等. 沼液在农业上的综合利用 [J]. *现代农村科技* 2008 (13): 59.
- [8] Zhang S, Bi X T, Clift R. Life cycle analysis of a biogas-centred integrated dairy farm-greenhouse system in British Columbia [J]. *Process Safety and Environmental Protection* 2015, 93: 18–30.
- [9] Baştalık B, Koçar G. A review of the biogas digestate in agricultural framework [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2020, 22 (5): 1318–1327.
- [10] 张丽萍, 刘红江, 盛婧, 等. 发酵周期、贮存时间和过滤对沼液养分和理化性状变化的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 (1): 32–39.
- [11] 刘庆玉, 李晓娟, 翟建宇, 等. 不同贮存条件对沼液成分的影响 [J]. *中国沼气* 2017, 35(1): 63–66.
- [12] 燕艳, 邹德勋, 王小伟, 等. 餐厨垃圾厌氧消化残余物污染特征分析 [C]. 2013 中国环境科学学会学术年会 2013.
- [13] 陈志龙, 陈广银, 李敬宜. 沼液在我国农业生产中的应用研究进展 [J]. *江苏农业科学* 2019, 47 (8): 6.
- [14] 娄梦函, 朱燕云, 朱宁, 等. 中温厌氧消化对猪、奶牛粪中腐殖质含量及结构的影响 [J]. *中国沼气*, 38 (3): 8.
- [15] 林继雄. 我国主要作物养分配比和施肥技术 [J]. *磷肥与复肥* 2001 (5): 63–66.
- [16] 贺梦璇. 基质添加对土壤种子库特征的影响研究 [D]. 天津: 南开大学 2015.
- [17] 刘敬, 吴健, 梁文华, 等. 贮存时间对沼液理化性质及白三叶种子萌发的影响 [J]. *中国沼气*, 2021, 39 (2): 22–27.
- [18] 李月丽. 碱性固体聚合物电解质制备及电性能的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学 2006.
- [19] 魏敏. 水体氨氮浓度对苦草种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *中国卫生产业* 2011, 8 (11X): 1.
- [20] 农业部规划设计研究院. 规模化畜禽养殖场沼气工程运行维护及其安全技术规程 NY/T(221—2018) [S]. 北京: 中国农业出版社 2006.
- [21] 孟庆国, 赵凤兰, 张聿高, 等. 气相色谱法测定沼液中的游离蛋白氨基酸 [J]. *农业环境保护* 2000(2): 104–105.
- [22] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析 [J]. *中国沼气* 2014, 32 (3): 4.
- [23] Lipczynska-Kochany E. Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: A review [J]. *Chemosphere* 2018, 202: 420–437.
- [24] 孙世海, 李树和, 罗莎. 不同基质浸提液对蔬菜种子萌发的影响 [J]. *种子世界* 2010 (9): 2.
- [25] 燕艳. 餐厨垃圾厌氧消化污染物的排放特征与环境风险分析 [D]. 北京: 北京化工大学 2014.
- [26] 王瑞, 何亮, 张萌, 等. 中国苦草属 (*Vallisneria*) 植物萌发与生长的影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33 (5): 19.
- [27] Ebner J H, Labatut R A, Lodge J S, et al. Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects [J]. *Waste Management* 2016, 52: 286–294.
- [28] 杨德坤, 颜成, 邬振江, 等. 鸟粪石结晶法去除餐厨沼液中氨氮的研究 [J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42, 181 (02): 116–123.