

张双双, 施正晟, 张 琴, 等. 微藻处理后的沼液对水稻种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 875-881.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.002

微藻处理后的沼液对水稻种子萌发与幼苗生长的影响

张双双¹, 施正晟¹, 张 琴^{1,2}, 叶生梅^{1,2}, 李艳宾^{1,2}

(1. 安徽工程大学生物与食品工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽省工业微生物分子育种工程实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为探讨沼液经微藻处理后对水稻种子的浸种及施用效果, 对比分析了不同体积百分比微藻处理后的沼液和未处理原沼液进行浸种以及作为培养液和叶面肥使用对水稻种子萌发及幼苗生长的影响。结果表明, 经微藻处理后的沼液浸种效果要优于原沼液, 其中以 50% 微藻处理后的沼液浸种效果最佳, 水稻种子的发芽势、发芽指数和活力指数较对照分别提高 176.8%、32.8% 和 74.0%。同样, 微藻处理能有效提高沼液的肥效, 水培条件下, 以 50% 微藻处理后的沼液为培养液, 水稻幼苗的根数、根长、根鲜质量及根系活力较对照分别提高了 62.5%、24.8%、42.2% 和 44.9%, 幼苗苗高、苗鲜质量及叶绿素含量分别提高了 26.5%、20.4% 和 102.5%。在沼液为培养液基础上再喷施未处理原沼液叶面肥易造成对水稻幼苗生长的抑制, 但喷施经微藻处理后的沼液能提高沼液肥效。在以 50% 微藻处理的沼液为培养液的基础上, 再喷施 25%~50% 的微藻处理后的沼液能促进水稻幼苗的生长。

关键词: 微藻处理沼液; 水稻; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S511; X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)04-0875-07

Effects of microalgae-treated biogas slurry on seed germination and seedling growth of rice

ZHANG Shuang-shuang¹, SHI Zheng-sheng¹, ZHANG Qin^{1,2}, YE Sheng-mei^{1,2}, LI Yan-bin^{1,2}

(1. College of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Anhui Engineering Laboratory for Industrial Microbiology Molecular Breeding, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to investigate the soaking and application effects of microalgae-treated biogas slurry on the rice seed, the effects of using microalgae-treated biogas slurry for soaking seeds, as cultured fluid and foliar fertilizer on rice seed germination and seedling growth were compared and analyzed. The results showed that the soaking effect of microalgae-treated biogas slurry was better than that of the original biogas slurry. The best soaking effect was obtained at the concentration of 50% microalgae-treated biogas slurry, and the germination potential, germination index and vigor index of rice seeds were increased by 176.8%, 32.8% and 74.0%, respectively, compared with the control. Similarly, microalgae treatment could effectively improve the fertilizer efficiency of biogas slurry. Under hydroponic culture condition, the root number, length, fresh weight and activity of rice seedlings 50% microalgae-treated biogas slurry were increased by 62.5%, 24.8%, 42.2% and 44.9%, respectively, and the seedling height, seedling fresh weight and chlorophyll content were increased by 26.5%, 20.4% and 102.5%, respectively. Spraying biogas slurry foliar fertilizer based on biogas slurry cultured fluid could easily inhibit the growth of rice seedlings, but the

fertilizer efficiency of biogas slurry could be improved after microalgae treatment. On the basis of using 50% microalgae-treated biogas slurry as cultured fluid, spraying 25%~50% microalgae-treated biogas slurry could promote the growth of rice seedlings.

Key words: microalgae-treated biogas slurry; rice; seed germination; seedling growth

收稿日期: 2021-12-05

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-010); 安徽省重点研究与开发计划项目(202004i07020003); 安徽省自然科学基金项目(2108085MB37)

作者简介: 张双双(1995-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事生物物质资源化利用研究。(E-mail) 1009447357@ qq.com

通讯作者: 李艳宾, (E-mail) ydhan@ 163.com

沼气发酵是目前畜禽粪污处理的主要方式。随着中国畜禽养殖规模的不断增大,沼气发酵后大量沼液的后处理逐渐成为亟待解决的问题^[1-2]。沼液富含氮、磷等营养元素及其他有机质^[3-4],因此在农业生产中常作为有机液体肥料对农作物进行浸种、灌根或叶面喷施等^[4-5]。沼液能提升种子内的酶活性,促进胚细胞分裂,从而刺激种子萌发与幼苗生长^[6],目前已广泛用于水稻^[7-8]、玉米^[1]、油菜^[9]和蔬菜^[10]等的浸种及栽培。

然而,也有研究结果表明,长期直接施用沼液不但对作物生长起不到促进作用^[11-12],过剩的养分积累还会通过地表径流或土壤渗透迁移到地表水和地下水,造成环境污染^[13]。微藻具有生长速率快,环境适应性强,可有效去除沼液中氮、磷等营养物质和重金属,附加值高等特点^[14-16],因此在沼液的处理与资源化利用中备受关注。Xu 等^[17]研究发现,先用沼液培养微藻,再以微藻处理后的沼液用于蔬菜栽培,能显著促进蔬菜生长并提高其品质,有效降低沼液直接施用的负面影响。但微藻处理后的沼液是否也可用于其他农作物尚未见报道。为此,本研究以水稻为研究对

象,探讨不同体积百分比沼液经微藻处理后进行浸种,作为基肥和叶面肥使用对水稻种子萌发及幼苗生长的影响,以期为沼液的高效利用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为 Y 两优 800,挑选饱满种子用于试验。微藻为小球藻(*Chlorella* sp.),由本实验室分离保藏。

供试沼液于 2021 年 6 月取自安徽省芜湖市安徽聚丰畜禽开发有限公司稳定运行的沼气池,沼气发酵原料主要为猪粪尿。分别用清水稀释成体积百分比为 25%、50%、75%、100%的沼液,并按 BG11 培养基组分补充适量营养元素,用于微藻培养处理。

以含 10%沼液的 BG11 培养基接种微藻进行培养,6 d 后按 10%比例接入上述不同体积百分比沼液中培养。培养条件为:温度 25 ℃,光照度 6 000 lx,光暗周期 16 h : 8 h,培养时间 12 d。离心、过滤除去微藻细胞,用于后续试验。原沼液及微藻培养处理后沼液中的养分及重金属含量见表 1。

表 1 微藻处理前后各体积百分比沼液中养分及重金属含量

Table 1 Nutrient and heavy metal contents in biogas slurry at different concentrations before and after microalgae treatment

沼液体积 百分比		化学需氧量 (COD)	总氮(TN)	总磷(TP)	速效氮 (N)	速效磷 (P)	Cu	Hg	Pb	Cr	Cd
25%	处理前(mg/L)	145.72	35.33	3.38	35.00	0.51	1.34	0.19	0.05	0.02	—
	处理后(mg/L)	30.37	7.30	0.50	4.67	0.49	1.14	0.10	—	0.01	—
	去除率(%)	79.2	79.3	85.2	86.7	3.1	14.9	47.4		41.6	
50%	处理前(mg/L)	289.56	73.54	7.55	45.50	0.65	2.63	0.14	0.14	0.03	0.005
	处理后(mg/L)	40.09	10.19	1.02	4.67	0.74	1.36	0.13	—	—	—
	去除率(%)	86.2	86.1	86.5	89.7	—13.3	48.2	13.2			
75%	处理前(mg/L)	428.34	107.34	11.89	105.58	0.70	3.96	0.15	0.25	0.05	0.020
	处理后(mg/L)	126.41	24.46	2.07	19.83	0.81	2.38	0.13	—	0.02	0.015
	去除率(%)	70.5	77.2	82.6	81.2	—16.6	39.8	10.9		63.1	21.8
100%	处理前(mg/L)	575.46	144.50	15.54	137.38	0.78	4.91	1.43	9.19	1.54	0.442
	处理后(mg/L)	200.13	51.87	3.99	40.25	0.89	4.86	0.81	5.12	0.85	0.309
	去除率(%)	65.2	64.1	74.3	70.7	—14.5	0.9	43.5	44.2	44.7	30.0

1.2 试验设计

1.2.1 沼液浸种及水稻种子萌发 分别用不同体积百分比原沼液和微藻处理沼液对水稻种子进行浸种,以清水浸种为对照,具体试验处理设置为:① 25%原沼液浸种(S1);② 50%原沼液浸种(S2);③ 75%原沼

液浸种(S3);④ 100%原沼液浸种(S4);⑤ 25%微藻处理后的沼液浸种(MS1);⑥ 50%微藻处理后的沼液浸种(MS2);⑦ 75%微藻处理后的沼液浸种(MS3);⑧ 100%微藻处理后的沼液浸种(MS4);⑨ 清水浸种(TW)。浸种温度 30 ℃,时间 24 h。浸泡后种子用清

水洗净,放入铺设2层滤纸的培养皿中,每皿20粒,再盖上一层滤纸,早晚喷洒适量清水以保持滤纸湿润,放入光照培养箱中培养。培养温度 $(30\pm 1)^{\circ}\text{C}$,光照度4 000 lx,光/暗周期14 h/10 h。每个处理5次重复。自第1 d起每天统计水稻种子萌发数,第7 d时测量根长、根直径、根系活力及干鲜质量。参照刘媛媛等^[18]方法计算种子发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数:①发芽势=(第3 d萌发种子数/种子总数) $\times 100\%$;②发芽率=(第7 d萌发种子数/种子总数) $\times 100\%$;③发芽指数= $\sum G_t/D_t$ (G_t 为第 t 天的萌发数, D_t 为种子萌发天数);④活力指数=发芽指数 \times 根长。根系活力测定采用TTC法^[6]。

1.2.2 沼液肥施用对水稻幼苗生长的影响 水稻种子经50%沼液浸种24 h后,铺于育苗盆(32.0 cm \times 24.0 cm \times 4.5 cm)中进行水培试验,分别以50%原沼液和50%微藻处理后的沼液为培养液模拟施用沼液基肥。在第6 d时再分别以叶面肥的形式喷施50 ml不同体积百分比沼液。以Hoagland营养液培养并在第6 d时喷施等量清水作为对照。具体试验设置如下:①Hoagland营养液+叶面喷洒清水(HN);②50%原沼液为培养液+叶面喷洒清水(PT1);③50%原沼液为培养液+叶面喷洒25%原沼液(PT2);④50%原沼液为培养液+叶面喷洒50%原沼液(PT3);⑤50%原沼液为培养液+叶面喷洒75%原沼液(PT4);⑥50%微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒清水(AT1);⑦50%微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒25%微藻处理后的沼液(AT2);⑧50%微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒50%微藻处理后的沼液(AT3);⑨50%微藻处理后的沼

液为培养液+叶面喷洒75%微藻处理后的沼液(AT4)。培养温度 $(30\pm 1)^{\circ}\text{C}$,光照度4 000 lx,光/暗周期14 h/10 h。每个处理3次重复。第12 d时测定水稻幼苗苗高、根数、根长、茎粗、幼苗地上部鲜质量和根鲜重等形态指标,以及根系活力和叶片叶绿素含量等生理指标。根系活力测定采用TTC法^[6]。叶绿素含量测定采用乙醇提取比色法^[19]。

1.3 数据分析

试验数据用SPSS18.0软件进行统计分析,用Origin8.5软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 微藻处理前后沼液浸种对水稻种子萌发的影响

从表2可以看出,与清水浸种(TW)对照相比,以50%~75%体积百分比的原沼液(处理S2~S3)进行浸种,水稻种子的发芽势、发芽率及发芽指数表现出一定的增加趋势,但增加幅度不显著。萌发种子的活力指数同样有随沼液体积百分比增加而增大的趋势,且在50%~100%原沼液体积百分比(S2~S4)时达到显著水平($P<0.05$)。而以微藻处理后的沼液进行浸种,其各体积百分比(MS1~MS4)处理水稻种子的发芽势、发芽指数和活力指数均显著($P<0.05$)高于原沼液和清水浸种处理。说明相比原沼液,用微藻处理后的沼液浸种能更有效地增强水稻种子萌发速率(发芽势和发芽指数)和已萌发种子的活力(活力指数)。各处理的种子发芽率并没有显著差异,表明无论是原沼液还是经微藻处理后的沼液浸种,对水稻种子最终是否萌发的影响有限。

表2 微藻处理前后沼液浸种对水稻种子萌发率及萌发速率的影响

Table 2 Effects of soaking seeds with biogas slurry before and after microalgae treatment on germination rate and germination speed of rice seeds

处理	发芽势 (%)	发芽率 (%)	发芽指数 (GI)	活力指数 (VI)
TW	28.00 \pm 3.00b	84.00 \pm 2.45a	14.28 \pm 0.41cd	81.07 \pm 4.51d
S1	25.00 \pm 2.89b	84.00 \pm 2.45a	13.74 \pm 0.59d	91.23 \pm 4.48cd
S2	32.50 \pm 3.23b	86.00 \pm 1.87a	15.14 \pm 0.22c	100.40 \pm 3.89c
S3	35.00 \pm 2.24b	85.00 \pm 3.87a	15.19 \pm 0.42c	97.71 \pm 4.21c
S4	25.00 \pm 3.16b	91.00 \pm 2.92a	15.21 \pm 0.47c	100.04 \pm 5.12c
MS1	76.30 \pm 3.15a	87.50 \pm 4.33a	17.33 \pm 0.49ab	115.63 \pm 2.82b
MS2	77.50 \pm 1.44a	93.33 \pm 1.67a	18.97 \pm 0.32a	141.03 \pm 5.87a
MS3	72.50 \pm 2.50a	87.50 \pm 1.44a	17.42 \pm 0.57ab	129.38 \pm 7.31ab
MS4	71.25 \pm 3.75a	86.67 \pm 1.67a	16.34 \pm 0.54b	113.63 \pm 5.95b

同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。TW表示用清水浸种,S1~S4分别表示用25%、50%、75%、100%的原沼液浸种,MS1~MS4分别表示用25%、50%、75%、100%的微藻处理后的沼液浸种。

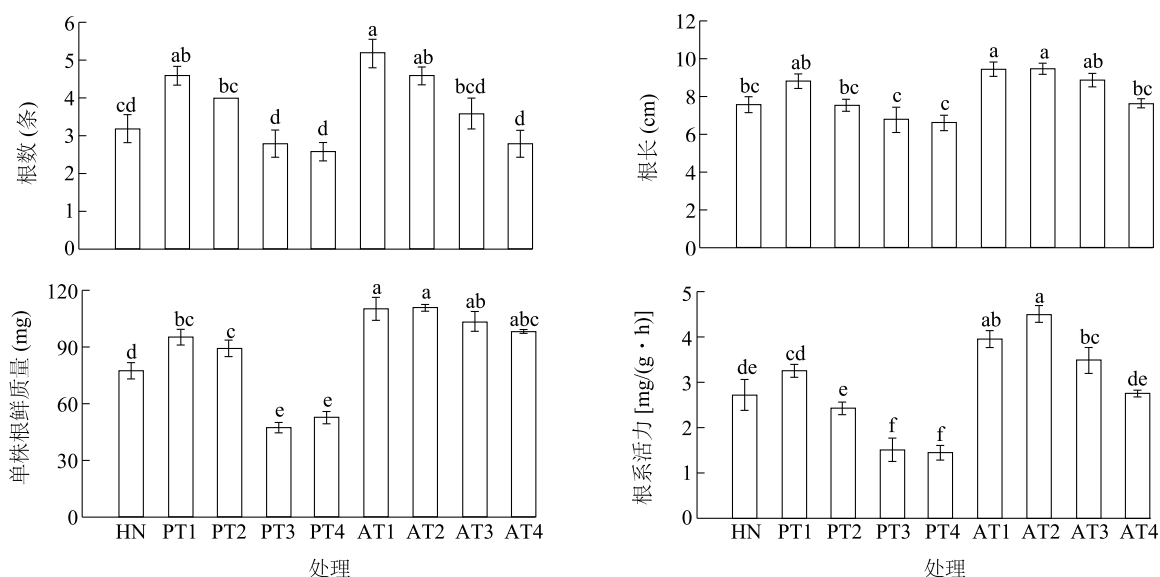
整体看来,沼液经微藻处理后,显著提升了沼液浸种的效果。其中以 50% 体积百分比的微藻处理后的沼液浸种 (MS2) 效果最好,其发芽势、发芽指数和活力指数相比清水浸种处理 (TW) 分别提高 176.8%、32.8% 和 74.0%。

2.2 微藻处理前后沼液施用对水稻幼苗生长的影响

以微藻处理前后的沼液作为基肥和叶面肥,进一步考察其对水稻幼苗生长的影响。总体来看,以 50% 体积百分比的原沼液 (PT1) 和微藻处理后的沼液 (AT1) 为培养液,均对水稻幼苗根系的生长发育具有较好的促进作用,其中 AT1 处理的效果整体优于 PT1 处理 (图 1)。相比于对照处理 (HN),AT1 处理水稻幼苗的根数、根长、根鲜质量及根系活力分别提高了 62.5%、24.8%、42.2% 和 44.9%,均达到显

著水平 ($P < 0.05$)。

从图 1 还可看出,在沼液为培养液的基础上,再分别喷施不同体积百分比原沼液或微藻处理后的沼液作为叶面肥 (PT2~PT4、AT2~AT4),水稻幼苗的根数、根长、根鲜质量及根系活力普遍有随喷施沼液体积百分比增加而降低的趋势,其中喷施原沼液 (PT2~PT4) 的降低趋势尤为明显。喷施微藻处理后的沼液的效果整体要好于原沼液,在 50% 微藻处理后的沼液为培养液的基础上,25% 微藻处理后的沼液叶面喷施处理 (AT2),水稻的根数、根长、根鲜质量及根系活力与仅使用微藻处理后的沼液为培养液处理 (AT1) 相比降低并不显著,当喷施微藻处理后的沼液体积百分比达到 50% 时 (AT3),水稻的根长、根鲜质量及根系活力也并无显著降低。



HN: Hoagland 营养液+叶面喷洒水; PT1: 50% 原沼液为培养液+叶面喷洒水; PT2: 50% 原沼液为培养液+叶面喷洒 25% 原沼液; PT3: 50% 原沼液为培养液+叶面喷洒 50% 原沼液; PT4: 50% 原沼液为培养液+叶面喷洒 75% 原沼液; AT1: 50% 微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒水; AT2: 50% 微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒 25% 微藻处理后的沼液; AT3: 50% 微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒 50% 微藻处理后的沼液; AT4: 50% 微藻处理后的沼液为培养液+叶面喷洒 75% 微藻处理后的沼液。柱状图上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 1 微藻处理前后沼液肥施用对水稻根系的影响

Fig.1 Effects of biogas slurry fertilizer application before and after microalgae treatment on rice root system

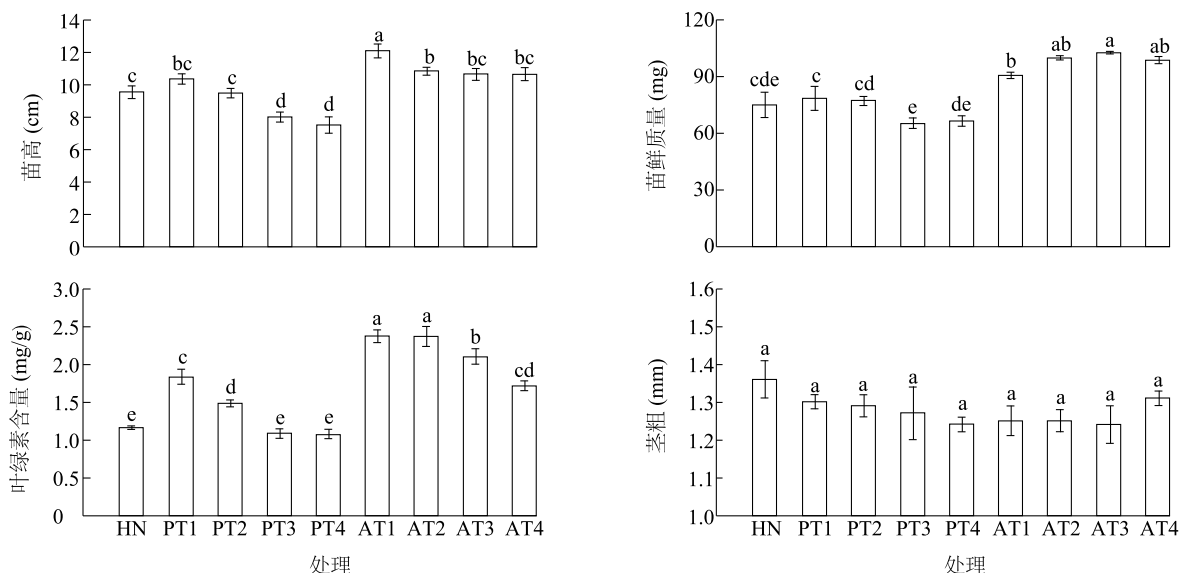
沼液对水稻幼苗地上部分的影响与根系类似 (图 2)。微藻处理后的沼液为培养液的效果整体要显著好于原沼液,AT1 处理的水稻幼苗高度、鲜质量及叶绿素含量分别比 HN 处理提高了 26.5%、20.4% 和 102.5%。

在 50% 沼液为培养液的基础上喷施沼液叶面

肥,水稻幼苗的苗高、鲜质量及叶绿素含量也有随喷施沼液体积百分比增加而降低的趋势。但整体上喷施微藻处理后的沼液的各项指标 (茎粗除外) 仍然要显著好于喷施原沼液各处理 (PT2~PT4) 及对照 (HN),说明微藻处理有效降低了原沼液基施加叶面喷施模式对水稻幼苗生长的抑制作用,发挥出较

好的肥效作用。特别是 50% 微藻处理后的沼液为培养液, 25% 微藻处理后的沼液叶面喷施处理 (AT2) 和 50% 微藻处理后的沼液叶面喷施处理

(AT3), 水稻幼苗的鲜质量相比于仅 50% 微藻处理后的沼液为培养液处理 (AT1) 有显著增高, 但 AT2 处理的叶绿素含量与 AT1 处理没有显著差异。



HN 等处理见图 1 注。柱状图上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 2 微藻处理前后沼液肥施用对水稻幼苗的影响

Fig.2 Effects of biogas slurry fertilizer application before and after microalgae treatment on rice seedlings

综上所述,与未经处理的原沼液相比较,以微藻处理后的沼液为培养液,更有利于促进水稻幼苗生长,表现出更好的肥效。在以微藻处理后的沼液为培养液加以微藻处理后的沼液为叶面肥模式中,喷施体积百分比过高的微藻处理后的沼液还会抑制幼苗生长,但以 25%~50% 的体积百分比喷施微藻处理后的沼液,与仅以微藻处理后的沼液为培养液处理 (AT1) 相比仍可有效增加幼苗鲜质量,但根长、根鲜质量、根系活力及茎粗等指标与 AT1 处理相比并无显著差异。

3 讨论

沼液中含有丰富的营养物质和微量元素,可被作物种子吸收利用从而促进种子萌发,因此在农作物和蔬菜种植等领域得到广泛利用^[18]。大量研究表明,沼液浸种对许多作物种子的萌发具有促进作用,沼液中的营养成分有助于破除种子休眠,刺激种子萌发和细胞分裂^[7-8,18-20]。但不同作物适宜的沼液浸种体积百分比差异较大,多数报道的最佳沼液体积百分比在 5% 至 25% 之间^[1,8,21],也有研究者指出沼液体积百分比达到 5% 时即对水稻种子萌

发产生抑制^[22]。

发芽势和发芽指数反映了种子的萌发速率,活力指数则反映已萌发种子的活力^[23]。本研究结果显示,以沼液原液浸种,水稻种子萌发各项指标与对照相比普遍有随沼液体积百分比增加而先升高后降低的趋势,其中 25%~100% 原沼液处理的水稻种子活力指数要显著 ($P < 0.05$) 高于对照,说明以原沼液浸种可有效提高种子的活力。但除活力指数外,原沼液各处理的其余指标变化均不显著。相对于沼液原液,以不同体积百分比微藻处理后的沼液浸种的各处理,其发芽势、发芽指数和活力指数均有大幅度的提升 ($P < 0.05$),说明沼液经微藻处理后,可增强其浸种效果,提高水稻种子的萌发速率和活力。

以沼液作基肥或叶面肥能促进作物生长,提升作物产量与品质^[5,18]。但沼液直接使用,也可能会因其过于丰富的养分含量等因素导致细胞液外渗,抑制作物根系对氮、磷等养分的吸收,最终影响作物碳水化合物的合成代谢^[17]。微藻可消耗掉沼液中部分养分,从而避免沼液养分体积百分比过高对植物生长和养分吸收的不利影响^[17,24]。此外,微藻生长代谢过程还能产生如吡啶乙酸、细胞分裂素等植

物激素类物质,从而起到促进作物生长、增强作物抗病性等作用^[25-26]。Xu 等^[17]利用微藻 *Scenedesmus* sp.对沼液进行处理,发现处理后沼液的 *COD*、*TN*、*TP*、铵态氮、无机磷等均显著降低,并对大白菜生长具有显著的促进作用,营养品质、食用口感等均有提升。本研究也获得类似结果,经微藻处理后,不同体积百分比沼液中的 *COD*、*TN*、*TP*、速效氮含量均显著降低,去除率64%~90%,但速效磷含量变化不大,甚至有一定量的增加。研究结果还表明,以微藻处理后的沼液为培养液更有利于促进水稻幼苗生长,表现出更好的肥效,有较好的应用潜力,这对沼液的减量化、资源化利用具有重要的意义。

沼渣、沼液的长期施用将增加土壤中重金属积累的风险,也对作物的生长带来不利影响。重金属对作物的伤害首先反映在种子萌发和幼苗生长方面^[27],过量的重金属将造成种子发芽率降低,根系生长受到抑制,植物体内代谢紊乱,从而影响其生长发育及产量^[27-28]。微藻具有良好的重金属毒性耐受性,具备吸收、富集和转化重金属的能力,因此在废水生物修复方面受到广泛关注^[17,29-32]。本研究测定了微藻处理前后,各体积百分比沼液中 *Cu*、*Hg*、*Pb*、*Cr*、*Cd* 等 5 种重金属的含量,结果显示经微藻处理后 5 种重金属含量均有不同程度的降低,这也可能是经微藻处理后的沼液浸种的水稻种子萌发及微藻处理后的沼液为培养液和叶面喷施幼苗生长普遍要优于原沼液各处理的原因之一。

在沼液为培养液的基础上再喷施沼液叶面肥的效果有限,喷施沼液的体积百分比过高还会抑制幼苗生长。但以 50%微藻处理后的沼液为培养液加喷施25%~50%微藻处理后的沼液,与仅使用 50%微藻处理后的沼液为培养液相比仍可有效增加幼苗鲜质量,其最终对水稻的产量与品质影响如何,有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 吴玉红,郝兴顺,崔平,等.沼液浸种对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国沼气,2017,35(5):70-74.
- [2] CHEN G, ZHAO G, ZHANG H, et al. Biogas slurry use as N fertilizer for two-season *Zizania aquatica* Turcz. in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 107(3): 1-18.
- [3] 靳红梅,常志州,叶小梅,等.江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J].农业工程学报,2011,27(1):291-296.
- [4] 巫小丹,岑庆静,吴冬梅,等.猪场沼液高值化综合利用研究进展及前景分析[J].中国沼气,2019,37(2):69-74.
- [5] 吴树彪,崔畅,张笑千,等.农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J].农业机械学报,2013,44(8):118-125.
- [6] 陆国弟,杨扶德,王惠珍,等.沼液浸种对蒙古黄芪种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].中国土壤与肥料,2019(5):155-162.
- [7] 李国雷,廖敏,吕婷,等.浓缩沼液浸种对水稻甬优12种子萌发及幼苗质量的影响[J].浙江农业科学,2018,59(11):1976-1979.
- [8] 邵天磊,邱凌,潘君廷,等.沼液与木醋液浸种对水稻种子发芽及幼苗生长的影响[J].西北农业学报,2016,25(11):1608-1614.
- [9] WU J, YANG Q, YANG G, et al. Effects of biogas slurry on yield and quality of oil-seed rape [J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(13): 2084-2098.
- [10] 张亚莉,刘桂芹,尹立红,等.沼液浸种对蔬菜生长发育的影响[J].北方园艺,2011(6):41-42.
- [11] SINGLA A, IWASA H, INUBUSHI K. Effect of biogas digested slurry based-biochar and digested liquid on N_2O , CO_2 flux and crop yield for three continuous cropping cycles of komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50: 1201-1209.
- [12] YANG H, YU D, ZHOU J, et al. Rice-duck co-culture for reducing negative impacts of biogas slurry application in rice production systems [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 213: 142-150.
- [13] LU J, JIANG L, CHEN D, et al. Decontamination of anaerobically digested slurry in a paddy field ecosystem in Jiading region of China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 13-22.
- [14] 叶庆,程军,赖鑫,等.小球藻高效净化猪场废水厌氧发酵沼液研究[J].环境科学学报,2019,39(6):1748-1753.
- [15] 王忠江,隋超,王泽宇,等.小球藻对不同沼液添加量培养液的适应性及净化效果[J].农业工程学报,2017,33(3):221-226.
- [16] 冯思然,朱顺妮,王忠铭.微藻污水处理研究进展[J].环境工程,2019,37(4):57-62.
- [17] XU Z M, WANG Z, GAO Q, et al. Influence of irrigation with microalgae-treated biogas slurry on agronomic trait, nutritional quality, oxidation resistance, and nitrate and heavy metal residues in Chinese cabbage [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 244: 453-461.
- [18] 刘媛媛,方楠,刘华娇,等.沼液对早熟禾种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2019,38(8):93-96.
- [19] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [20] 方楠,程辉彩,吴健,等.青霉菌菌渣厌氧发酵沼液对红三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J].环境污染与防治,2019,41(7):762-766.
- [21] 史向远,周静,王保平,等.不同浓度沼液浸种对西瓜种子萌

- 发的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(10): 1611-1614.
- [22] 倪天驰, 周长芳, 朱洪光, 等. 沼液浸种对水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 594-599.
- [23] 陈雅玲, 杜亚楠, 梅怡然, 等. 水铁矿对小麦和水稻种子萌发的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 814-820.
- [24] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ L M, ZHOU L, ASTALS S, et al. Biogas production coupled to repeat microalgae cultivation using a closed nutrient loop [J]. Bioresource Technology, 2018, 263: 625-630.
- [25] GONZÁLEZ-PÉREZ B K, RIVAS-CASTILLO A M, VALDEZ-CALDERÓN A, et al. Microalgae as biostimulants: a new approach in agriculture [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38: 4.
- [26] LU Y, XU J. Phytohormones in microalgae: a new opportunity for microalgal biotechnology? [J]. Trends in Plant Science, 2015, 20(5): 273-282.
- [27] 孙颖, 苗林琦, 孟儒, 等. 重金属 Zn^{2+} 对凤尾鸡冠花 2 个品种种子萌发、幼苗生长及生理活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 133-139.
- [28] 张天, 范明慧, 田胜尼, 等. 重金属铜、镉对三种十字花科植物种子萌发的影响[J]. 信阳农林学院学报, 2021, 31(3): 92-99.
- [29] 陈帅行, 马浩天, 于杰, 等. 基于 Fenton 氧化法预处理高氨氮废水培养斜生栅藻[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 279-285.
- [30] 聂磊, 蔡文涛, 黄一凡, 等. 基于时间序列的微藻生长环境参数的预测模型[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1183-1189.
- [31] 许洪高, 周琪乐, 鲁绯, 等. 螺旋藻养殖加工和安全性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 10-19.
- [32] KUMAR K S, DAHMS H, WON E, et al. Microalgae - A promising tool for heavy metal remediation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113: 329-352.

(责任编辑:张震林)