

马铃薯基沼液灌溉对盆栽香菜生长的促进作用研究

王靖雯¹, 熊子皓¹, 孟成真¹, 黄春阳¹, 樊冰冰¹, 乔清涛², 吴舒¹

(1. 河北环境工程学院 河北省农业生态安全重点实验室, 河北 秦皇岛 066102;
2. 秦皇岛市三力食品有限责任公司, 河北 秦皇岛 066600)

[摘要] 针对马铃薯淀粉废水沼液资源化利用需求, 探究经除杂处理的沼液替代灌溉水对盆栽香菜生长的影响, 评估其作为水肥资源的技术可行性。设置4个处理: 空白对照 (CK, 纯自来水)、5倍稀释沼液 (T1)、7倍稀释沼液 (T2)、10倍稀释沼液 (T3)。沼液经除杂预处理后, 浊度与化学需氧量 (COD) 显著降低, 其对种子的发芽率与发芽指数表现促进作用, 以5倍稀释沼液组效果最好。结果表明T1、T2、T3处理均显著提升了香菜根系活力、株高及茎粗, 地上部分的鲜质量与干质量较CK分别增加17.40%~48.60%与19.42%~44.75% ($P<0.05$), 其中T1 (5倍稀释) 综合表现最优; 土壤剖面分析显示, 沼液灌溉可通过带入碱性物质和可溶性养分提升土壤pH和电导率, 且提升效果与沼液浓度、土壤深度相关, 但所有处理组的土壤pH和电导率均处于作物适宜范围, 沼液灌溉未引发土壤盐渍化或酸碱失衡。研究表明, 经除杂预处理马铃薯淀粉沼液可作为安全有效的水肥资源, 在适宜稀释浓度下灌溉叶菜类作物, 实现“以废促生”与农业水肥资源的协同替代。

[关键词] 马铃薯基沼液; 膜过滤; 灌溉; 香菜; 生长; 资源化利用

[中图分类号] S145.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0102-07

Study on promoting effect of potato-based biogas slurry irrigation on growth of potted cilantro

WANG Jingwen¹, XIONG Zihao¹, MENG Chengzhen¹, HUANG Chunyang¹,
FAN Bingbing¹, QIAO Qingtao², WU Shu¹

(1. Hebei University of Environmental Engineering, Hebei Key Laboratory of Agroecological Safety,
Qinhuangdao 066102, China; 2. Qinhuangdao Sanli Food Co., Ltd., Qinhuangdao 066600, China)

Abstract: In response to the demand for resource utilization of potato-based biogas slurry, the effect of potato-based biogas slurry irrigation on the growth of potted cilantro is investigated, and its technical feasibility as a water fertilizer resource is assessed. Four treatments are set up, including blank control (CK, pure tap water), 5-fold dilution of the digestate (T1), 7-fold dilution of the digestate (T2), and 10-fold dilution of the digestate (T3). The turbidity and COD of the biogas are significantly reduced after the pretreatment of decontamination, showing an promoting effect on seed germination rate or germination index, with the 5-fold diluted biogas slurry group performing relatively better. The results show that T1, T2 and T3 treatments significantly increase the root vigor, plant height and stem thickness, and the fresh and dry weights of aboveground parts are increased by 17.40% - 48.60% and 19.42% - 44.75%, respectively, compared with that of CK ($P<0.05$), among which the T1 (5-fold dilution) is the best performance; The profile data confirm that the three biogas (T1, T2 and T3) can improve the soil pH and conductivity by bringing in alkaline substances and soluble nutrients, and the improvement effect is related to the concentration of the biogas and the depth of the soil; However, the soil pH and EC values of all treatment groups are within the suitable range for crops, and biogas slurry irrigation does not cause soil salinization or acid-base imbalance. Research has shown that potato-based biogas slurry pre treated with impurity removal can be used as a safe and effective water and

收稿日期: 2025-07-26

作者简介: 王靖雯 (2004—), 女, 河南郑州人, 现就读于河北环境工程学院, 食品质量与安全专业。

通信作者: 吴舒 (1985—), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 高级工程师, 主要从事农业资源与环境/新型肥料研发方面的研究。

基金项目: 河北环境工程学院重点项目“淀粉废水沼液资源化利用关键技术与农灌替代示范”(XJXM-ZD-2025001); 2025 国家级大学生创新训练计划 (202551721006)

fertilizer resource for irrigating leafy vegetables at a suitable dilution concentration, achieving “waste to promote growth” and a synergistic substitution of agricultural water and fertilizer resources.

Key words: potato-based biogas slurry; membrane filtration; irrigation; cilantro; growth; resource utilization

0 引言

马铃薯现已成为世界第三大粮食作物,我国是当今世界上马铃薯第一大生产国^[1]。随着我国马铃薯淀粉加工工业的规模化发展,其副产物淀粉废水经厌氧消化处理后残留的沼液总量急剧攀升^[2-3]。据估算,每生产淀粉1 t产生废水20~30 t^[4-5]。《“十四五”可再生能源发展规划》提出利用生物质厌氧发酵生产清洁燃气技术处理有机废弃物,产生的生物质沼气可直接发电、供热,也可以耦合发电及提纯生物天然气等。传统沼液处置方式受限于季节性消纳能力不足、远距离运输成本高昂,且未处理沼液中高浊度、高化学需氧量(COD)及杂质易导致灌溉系统堵塞,制约其规模化应用^[6-7]。如何实现沼液安全、高效、低成本资源化,已成为淀粉产业绿色转型的核心瓶颈。

沼液富含氮、磷、钾及有机质等植物必需养分,理论上具备替代部分化肥与灌溉水的双重潜力^[8-9]。现有研究多聚焦沼液作为水稻、玉米等大田作物^[10-12]追肥的肥效评价,而针对低浓度沼液直接替代灌溉水的“水肥一体化”模式研究薄弱,尤其对需水量大的叶菜类作物研究较少^[13-14]。值得注意的是,未处理沼液的高浊度与高COD易引发滴灌系统堵塞、土壤缺氧及根系胁迫^[15-17],亟须通过预处理提升其灌溉适用性。《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》中明确指出着力解决好厌氧工艺中沼液等产物在农业生产中应用的“梗阻”问题。

基于此,本研究提出“除杂预处理-灌溉替代-水肥协同”的沼液资源化技术路径,通过物理除杂工艺显著降低沼液浊度与COD,保障灌溉系统稳定性;以盆栽香菜为供试作物,探究沼液替代灌溉水对设施农业的适用性;通过设置梯度稀释处理(5倍、7倍与10倍),明确“水肥协同”效应阈值,规避盐渍化风险。研究结果将为马铃薯淀粉废水沼液的高值化利用提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试作物与土壤

栽培土壤:取自0~20 cm深度的农田表层土(壤土),风干过2 mm筛,基础理化性质为 w (有机质) 12.7 g/kg、 w (碱解氮) 68.3 mg/kg、 w (速效

磷) 21.5 mg/kg、 w (速效钾) 110.4 mg/kg。

栽培容器:聚乙烯塑料盆(上口径25 cm,口径18 cm,高30 cm),香菜经穴盘育苗后移栽(秦皇岛睿耕农业科技有限公司提供香菜种子)。

1.2 沼液来源与预处理

1.2.1 沼液处理工艺

供试沼液:取自马铃薯淀粉厂淀粉废水规模化沼气工程,获得的厌氧发酵残余物(沼液)特性: ρ (COD) 20 000 mg/L, pH 8.5, 浑浊, w (沼渣及悬浮颗粒) 1.5%~2.0%, 透视效果差。

除杂工艺:沉淀+粗过滤+膜过滤,沼液清澈度显著提升,沼液 ρ (COD) \leq 1 000 mg/L, w (水不溶物) \leq 1%, 适配水肥一体化灌溉系统。

1.2.2 分析方法

沼液指标测定依据如表1所示。

表1 沼液养分、重金属检测依据

Table 1 Basis for nutrient and heavy metal detection in biogas slurry

项目类别	检测依据
总氮	GB/T 8572—2010
总磷	GB/T 8573—2017
COD _{cr}	HJ 828—2017
重金属(砷、铬、镉、铅、汞)	GB/T 23349—2020

1.3 种子发芽率、发芽指数的指标测定

1.3.1 材料与仪器

材料:黄瓜种子(秦皇岛盛裕农业科技发展有限公司)、水(应符合GB/T 6682—2008三级水的规定)。仪器:培养皿、定性滤纸、移液管、恒温培养箱、游标卡尺。

1.3.2 实验步骤

曝气处理:取预处理后的沼液,用曝气泵对沼液进行连续曝气,并控制曝气强度(以沼液表面均匀冒泡、不剧烈翻滚为宜),持续24 h。

沼液稀释:5倍稀释组T1(1份沼液+4份水)、7倍稀释组T2(1份沼液+6份水)、10倍稀释组T3(1份沼液+9份水)及空白对照组CK(水)。

种子萌发与根长测定:在9 cm培养皿中放置1张定性滤纸,在其上均匀放入10粒大小基本一致、饱满的黄瓜种子,加入供试沼液稀释液10 mL,盖上培养皿盖,在27 °C的培养箱中避光培养48 h,统

计发芽种子的粒数，并用游标卡尺逐一测量主根长。

实验过程中，对每个稀释度及空白进行4次平行实验。

1.4 实验设计

1.4.1 处理设置

采用随机区组设计，共设4个处理（见表2），每处理6次重复，每盆定苗10株。

表2 各处理灌溉液的组成
Table 2 Composition of irrigation fluid of different treatments

处理	w(沼液)/%	灌溉液组成
CK	0	自来水
T1	20.0	1份沼液+4份自来水
T2	14.3	1份沼液+6份自来水
T3	10.0	1份沼液+9份自来水

注：自来水电导率为55 μS/cm。

1.4.2 灌溉管理

实验周期共70 d，应用土壤水分探测仪，当土壤w(H₂O)降至田间持水量60%时灌溉，避免水量差异干扰，所有处理保持等体积灌溉，每次300 mL/盆。

1.5 数据分析

1.5.1 净化效果评价

为表征沼液深度净化后的清澈度，进行如下实验。取50 mL自来水与深度净化后的4组沼液，分别置于培养皿中。在培养皿底部放置印有清晰黑色字样的纸。依据光学原理，当光线透过液体时，悬浮物浓度会影响光的传播与散射，进而影响视觉清晰度。

1.5.2 种子发芽率及发芽指数指标

种子发芽率及发芽指数分别按式(1)(2)计算：

$$\text{发芽率} = \frac{\text{发芽种子数}}{\text{总种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{GI} = \frac{A_1}{B_1} \times \frac{A_2}{B_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中 GI——种子发芽指数，%；

A₁——沼液培养的种子中发芽粒数占放入总粒数的比值，%；

A₂——沼液培养的全部种子的平均根长，mm；

B₁——水培养的种子中发芽粒数占放入总粒数的比值，%；

B₂——水培养的全部种子的平均根长，mm。

1.5.3 植株指标

植株生长指标涵盖根系活力、株高（直尺法测定）、茎粗（游标卡尺测量基部直径）、鲜质量（电子天平即时称量）及干质量（经105℃杀青后80℃烘干至恒质量测定）。

1.5.4 土壤指标

土壤环境参数分析采用分层采样策略，分别对0~10、10~20、20~30 cm土层土样进行测定，具体包括：电导率（依据HJ 802—2016，使用电导率仪测定）和pH（依据NY/T 1121.2—2006，使用pH计测定）。

1.5.5 实验数据处理方法

实验数据经Excel 2010整理后，采用SPSS 27.0软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），处理间差异显著性通过Duncan’s多重比较检验（P<0.05）判定。土壤剖面电导率及pH指标采用GraphPad Prism 10软件绘图。

2 结果与分析

2.1 沼液净化效果

本研究通过“沉淀+粗过滤+膜过滤”工艺对沼液进行系统处理，实现了水质提升与养分富集的双重目标，沼液浊度显著下降，固相物去除率达到99.2%，ρ(COD)由初始的(20 000 ± 350) mg/L降低至(860 ± 25) mg/L。净化沼液清澈度对比见图1。如图1所示，随着固体悬浮物的浓度下降，沼液清澈度明显提升，字迹越清晰表明光传播阻碍越小，即悬浮物浓度越低，液体清澈度越高。重金属安全控制方面，镉、铬、砷、汞、铅的浓度符合GB/T 40750—2021农用沼液对重金属浓度的限值要求。



图1 净化沼液清澈度对比

Fig. 1 Comparison of clarity of purified biogas slurry

2.2 不同处理对种子发芽率、发芽指数的影响

不同处理的种子发芽率指标见表3。从表3来看，经沼液处理的种子发芽率均高于空白对照组CK，其中T1的发芽率最高，T2次之，T3略低但仍高于CK，这表明沼液处理对种子发芽具有促进作用，且5倍稀释的沼液（T1）促进效果最佳，7倍稀释（T2）效果次之，10倍稀释（T3）效果有所减弱但仍优于清水对照，说明适宜浓度的沼液可有

表3 不同处理的种子发芽率指标

Table 3 Seed germination rate indicators of different treatments

处理	种子发芽率/%
CK	82.500 ± 4.787b
T1	97.500 ± 2.500a
T2	95.000 ± 2.887a
T3	90.000 ± 4.082ab

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

表4 不同处理的种子发芽指数指标

Table 4 Seed germination index indicators of different treatments

处理	种子发芽指数/%
T1	130.160 ± 0.857a
T2	125.900 ± 1.175b
T3	100.320 ± 0.842c

效提高种子发芽率。

不同处理的种子发芽指数指标见表4。由表4可知,所有稀释倍数的沼液处理其GI值均超过100%,这表明预处理后的沼液不仅消除了对种子发芽的潜在抑制作用,而且产生了积极的刺激效应。其中,T1处理(5倍稀释)的促进作用最为显著,发芽指数最高,达到130.16%,且与T2(125.90%)和T3(100.32%)处理存在显著差异。T2处理(7倍稀释)也表现出极强的促进效果,而T3处理(10倍稀释)的促进作用虽相对较弱,但仍优于空白清水对照。

4次平行实验直观结果(见图2):T1和T2组

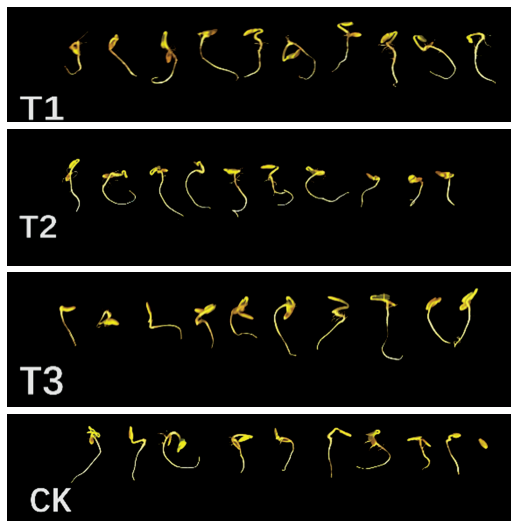


图2 4次平行实验直观结果

Fig. 2 The visual results of four parallel experiments

的种子萌发状态更旺盛、发芽数量更多、幼苗长势更整齐,反映出发芽率和发芽指数处于较高水平;而T3组种子发芽情况虽不及前两组,但发芽数量和幼苗健壮程度优于空白对照组CK。4次平行实验的结果高度一致,进一步验证了沼液处理对种子发芽具有促进作用。同时佐证了预处理后的沼液无潜在抑制作用,其促进效果与稀释浓度呈现关联性。

2.3 不同处理对香菜根系活力的影响

不同处理对香菜根系活力的影响见图3。从图3的根系形态观察可见,T1(5倍稀释沼液)、T2(7倍稀释沼液)、T3(10倍稀释沼液)处理的香菜根系,在发达程度和根量上均显著优于CK(清水对照)处理。具体表现为根系分支更多(侧根数量较CK增加30%~50%)、主根长度更长(可达CK的1.5~2.0倍),且根系整体色泽鲜亮,无枯萎或褐变迹象。

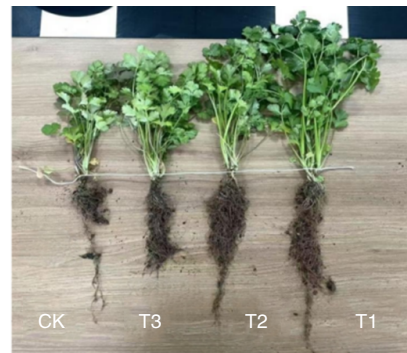


图3 不同处理对香菜根系活力的影响

Fig. 3 Effect of different treatments on the root vitality of cilantro

2.4 不同处理对香菜生长指标的影响

不同处理对香菜生长指标的影响如表5所示。由表5可知,在成熟期,与CK处理相比,T1、T2、T3处理香菜植物的株高均有不同程度增加,且差异均达到显著水平。T1、T2、T3处理香菜植株的茎粗与CK处理相比,分别增加了29.03%、27.22%、17.26%,差异均达到显著水平;而鲜质量以T1处理效果最优,T2处理次之,2个处理鲜质量差异显著,与CK处理相比,T1和T2处理的鲜质量分别增加了48.60%、42.70%,差异均达到显著水平。干质量表现与鲜质量趋势适配,以T1处理最优,T2处理次之,二者干质量存在显著差异;与CK处理相比,T1和T2处理的干质量分别提升了44.75%、39.58%,

表5 不同处理的香菜生长指标

Table 5 Growth indicators of cilantro of different treatments

生育期	处理	株高/mm	茎粗/mm	鲜质量/g	干质量/g
幼苗期	CK	5.203 ± 0.060d	0.807 ± 0.047c	0.857 ± 0.055c	0.118 ± 0.009c
	T1	7.505 ± 0.061a	1.091 ± 0.050a	1.317 ± 0.051a	0.165 ± 0.010a
	T2	7.063 ± 0.843b	1.033 ± 0.048ab	1.237 ± 0.054a	0.148 ± 0.007ab
	T3	6.318 ± 0.061c	0.945 ± 0.033bc	1.025 ± 0.062b	0.128 ± 0.007bc
生长期	CK	12.795 ± 0.062d	1.475 ± 0.044c	5.345 ± 0.055d	0.688 ± 0.011d
	T1	17.973 ± 0.070a	1.875 ± 0.034a	7.970 ± 0.065a	1.005 ± 0.112a
	T2	17.092 ± 0.088b	1.825 ± 0.058a	7.668 ± 0.062b	0.950 ± 0.010b
	T3	15.225 ± 0.072c	1.677 ± 0.057b	6.432 ± 0.061c	0.817 ± 0.013c
成熟期	CK	22.717 ± 0.081d	1.767 ± 0.053c	11.718 ± 0.052d	1.200 ± 0.014d
	T1	31.297 ± 0.068a	2.280 ± 0.052a	17.413 ± 0.039a	1.737 ± 0.013a
	T2	29.878 ± 0.074b	2.248 ± 0.068a	16.722 ± 0.070b	1.675 ± 0.016b
	T3	26.497 ± 0.068c	2.072 ± 0.044b	13.757 ± 0.039c	1.433 ± 0.015c

差异均达显著水平。

2.5 不同处理对土壤剖面pH及电导率的影响

不同处理对土壤pH及电导率的影响分别见图4、图5。由图4可知，T1、T2和T3沼液处理组均能提高土壤的pH，其效果受沼液浓度和土壤深度影响显著。所有处理组的pH均随土壤深度增加而下降，其中T1降幅最大(0.43)，T2最小(0.20)，CK最稳定(降幅0.08)。在同一深度下，上层土壤pH表现为T1 > T2 > T3 > CK，这与高浓度T1在浅层带入大量碱性物质密切相关；深层土壤中T2处理的pH值最高且更稳定，推测源于其适中浓度利于沼液均匀下渗并维持碱性；T3处理因浓度较低带入碱性物质总量不足，其pH整体低于T1和T2。该结果与王一佩^[18]的研究结论吻合，指出沼液浇灌通过硝化反应增加土壤铵态氮比例从而提高pH，且能促进养分向下迁移，为本研究揭示的沼液浓度对土壤pH垂直分布影响机制提供了理论依据。

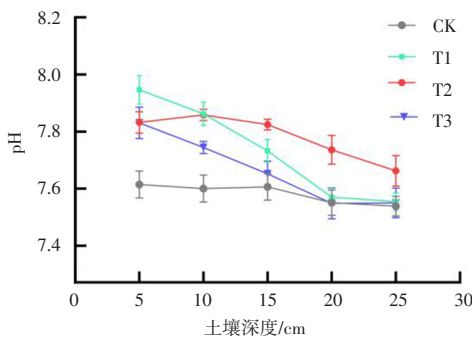


图4 不同处理对土壤pH的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on soil pH

土壤电导率(EC)的差异性与pH值变化显著协同。如图5所示，所有处理组的EC同样随土壤深度增加而降低。在同一深度下，上层土壤电导率值排序为T1 > T2 > T3 > CK，且所有沼液处理组的电导率均高于CK，仅在深层土壤中各组间差距有所缩小。这与杜妍宁^[19]的研究结论相印证，其指出“沼液能够提高土壤电导率、有机质及N、P、K等养分含量”。表明本研究中沼液处理组EC升高本质上是由于沼液补充了更多可溶性养分，而不同浓度处理导致的EC梯度差异则与养分输入量的差异直接相关，为解析香菜在不同处理下的生长差异提供了关键依据。

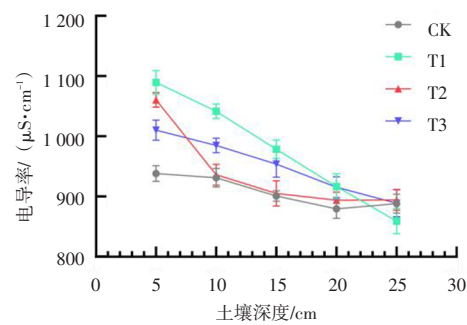


图5 不同处理对土壤电导率的影响

Fig. 5 Effect of different treatments on soil conductivity

3 讨论

3.1 不同处理对香菜根系活力的影响

在香菜种植实验的研究范畴内，施加适宜浓度沼液的处理，能够对香菜的根系生长发育产生显著的促进作用，同时有效改善根际微环境，让根系所处的局部环境更利于其吸收养分、维持生理活性，

这与孟清波等^[20]的研究结论一致。

3.2 不同处理对香菜生长指标的影响

在香菜种植实验中,不同处理对香菜生长指标的影响表现为T1>T2>T3>CK处理。其中,沼液浓度增加可显著提高株高和茎粗,这与陆国弟等^[21]关于沼液显著促进植株株高及茎粗增长的研究结论基本吻合;且蒋守华等^[22]研究表明浇施沼液对黄瓜的株高、叶数、鲜质量及干质量(生物产量)均具有一定正效应。以上表明,沼液可通过促进光合产物积累、优化养分分配,增强香菜对有机物的储存能力。

3.3 不同处理对土壤剖面pH及电导率的影响

不同浓度沼液处理均能有效提升土壤pH和电导率,其中T1(5倍稀释沼液)效果最显著——其浅层土壤pH(7.81)和上层土电导率(1 009 $\mu\text{S}/\text{cm}$)均居首位,提升幅度也优于T2(7倍稀释)、T3(10倍稀释)及空白对照组(CK)。较高浓度沼液带入更多碱性物质和可溶性养分,从而在调节土壤酸碱度(pH)和增加可溶性养分含量(EC)两方面均产生更强的改良效应。这与高浪涛^[23]的研究结果一致,其认为沼液对土壤结构和养分含量的改良作用有间接影响。从安全性看,所有处理组土壤pH(7.36~7.81)均处于作物适宜的弱碱性范围,且随深度增加平缓下降(最大降幅0.43),无剧烈波动。T1处理组上层土的电导率最高为1 009 $\mu\text{S}/\text{cm}$,低于赵国华等^[24]研究的盐渍化临界值——电导率为0~2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 为非盐渍化土壤。且电导率随深度自然下降、深层差距缩小,表明沼液带入的可溶性养分未过度积累形成盐分聚集,而是发生了自然迁移。因此,沼液处理引起的土壤pH与电导率变化均处于正常理化性质波动范围内,未超出安全阈值或引发负面效应。

4 结论

马铃薯淀粉沼液具有天然的资源优势:其不仅富含氮、磷、钾及小分子活性物质,能显著提升土壤速效养分含量;且本身呈弱碱性,可中和酸性土壤中的氢离子,改善土壤酸碱环境;更重要的是,由于原料为淀粉,其重金属本底值远低于畜禽粪便,能从源头规避农田重金属累积风险。

基于这些特性,沼液灌溉可通过协同供应水分与养分,发挥多重改良作用——不仅能优化作物根系构型、增强有机物储存,还能调节土壤酸碱度、增加可溶性养分含量,最终实现作物生物量的高效积累,其中,5倍稀释沼液(T1)的促生效能最为

突出(成熟期鲜质量提升48.60%,干质量提升44.75%)。

为进一步适配规模化应用,经“沉淀+粗过滤+膜过滤”工艺处理后的沼液,浊度和COD显著下降,完全满足灌溉系统要求,可替代部分灌溉水和化学肥料,尤其适用于生菜、菠菜等日均需水量较大的叶菜类作物,为沼液资源的规模化消纳提供了切实可行的路径。

[参考文献]

- [1] 孙邦升,宋继玲,杨梦平,等.117份高抗晚疫病马铃薯种质资源遗传多样性分析[J].中国瓜菜,2024,37(9):37-46.
SUN B S, SONG J L, YANG M P, et al. Diversity analysis of 117 potato germplasm resources with high resistance to late blight [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(9): 37-46.
- [2] 赵博超,王雪婷,周添红,等.基于成分分析的马铃薯淀粉工艺废水农田利用环境风险研究[J].环境保护科学,2026,52(1):161-166.
ZHAO B C, WANG X T, ZHOU T H, et al. Research on environmental risk of potato starch process wastewater utilization in farmland based on composition analysis [J]. Environmental Protection Science, 2026, 52(1): 161-166.
- [3] 王宇航.秸秆沼液在蔬菜上的农用效果及复配应用[D].武汉:华中农业大学,2023.
WANG Y H. The Application and Compounding of Straw Biogas Slurry on Vegetables [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [4] 莫钊宇.马铃薯淀粉加工废弃物的再利用研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2023.
MO F Y. Study on the Reuse of Potato Starch Processing Waste [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023.
- [5] 李芳蓉,贺莉萍,王英,等.马铃薯淀粉生产废水资源化处理及综合利用[J].粮食与饲料工业,2018(6):31-37.
LI F R, HE L P, WANG Y, et al. Waste water treatment in potato starch production and comprehensive utilization [J]. Cereal & Feed Industry, 2018(6): 31-37.
- [6] 段国唯.沼液耐受性运动发酵单胞菌菌株选育及乙醇发酵工艺研究[D].[出版地不详]:中国农业科学院,2019.
DUAN G W. Breeding of Biogas Slurry Tolerant Zymomonas mobilis Strain and Ethanol Fermentation Technology [D]. [S.l.]: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [7] 袁闯,龚蔚成,匡宏业.沼液膜浓缩技术研究进展[J].农业与技术,2017,37(21):166-169.
YUAN C, GONG W C, KUANG H Y. Research Progress on Membrane Concentration Technology of Biogas Slurry [J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(21): 166-169.
- [8] 董晶晶,应晓成,徐军,等.沼液替代化肥对水稻生长的影响[J].安徽农学通报,2017,23(4):39-41,44.
DONG J J, YING X C, XU J, et al. Effect of Chemical Fertilizers Substitution by Biogas Slurry on the Growth of Rice [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(4): 39-41, 44.
- [9] 董娜.蔬菜废弃物发酵生产沼液技术及应用[D].咸阳:西北农

- 林科技大学,2024.
- DONG N. Technology and application of vegetable waste fermentation to produce biogas slurry[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2024.
- [10] 赵俊伟. 畜禽粪污资源化利用方式及可行性分析——以沈阳树新畜牧有限公司为例[J]. 中国农民合作社, 2025(6): 42-44.
- ZHAO J W. Resource Utilization Methods and Feasibility Analysis of Livestock and Poultry Manure: A Case Study of Shenyang Shuxin Animal Husbandry Co., Ltd. [J]. Chinese Farmers' Cooperatives, 2025(6): 42-44.
- [11] 王波清, 颜庭琦. 我国东北、西北、华北、沿海地区土壤盐碱化治理的研究现状与展望 [J]. 中国农业文摘-农业工程, 2025, 37(4): 33-41.
- WANG B Q, YAN T Q. Research Status and Prospects of Soil Salinity Management in Northeast, Northwest, North China, and Coastal Areas of China [J]. Chinese Agricultural Abstracts-Agricultural Engineering, 2025, 37(4): 33-41.
- [12] 张迎, 王志刚, 徐伟慧, 等. 谷氨酸废液生物转化浆液发酵条件优化及促生作用 [J]. 微生物学杂志, 2025, 45(2): 32-42.
- ZHANG Y, WANG Z G, XU W H, et al. Optimization of Fermentation Conditions and Growth Promotion of Glutamate Biotransformation Slurry [J]. Journal of Microbiology, 2025, 45(2): 32-42.
- [13] 魏泉源. 规模化沼气工程沼液、沼渣减量化及资源化利用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- WEI Q Y. Study on Reduction and Resource Utilization of Biogas Slurry and Slag from Large-Scale Biogas Projects [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [14] 祁步凡, 王虹, 李俊, 等. 沼液膜浓缩液复配肥对小白菜的肥效及安全性研究 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 89-93.
- QI B F, WANG H, LI J, et al. Fertilizer Efficiency and Safety of Liquid Digestate Membrane Concentrate Based Fertilizer on Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(1): 89-93.
- [15] 赵雨露. 沼液滴灌条件下多种灌水器堵塞特征与堵塞物成分分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- ZHAO Y L. Plugging Characteristics and Composition Analysis of Various Irrigation Emitters under Biogas Slurry Drip Irrigation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [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氮化潜力的影响 [J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 738-748.
- YANG Z S, XU C H, TANG Y F, et al. Effects of Substitution of Chemical Fertilizer with Biogas Slurry and Combined with Straw on Denitrification and Nitrate Ammoniation Potential of Paddy Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 738-748.
- [17] 贺清尧, 石明菲, 冯棕, 等. 基于膜蒸馏的沼液资源化研究进展 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 259-268.
- HE Q Y, SHI M F, FENG L, et al. Research progress of biogas slurry resourceful treatment by membrane distillation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 259-268.
- [18] 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]. 南宁: 广西大学, 2018.
- WANG Y P. Effects of Irrigation Intensity of Biogas Slurry on Soil and Plant Nutrients and Heavy Metal Content [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [19] 杜妍宁. 施用沼液和生物炭对杨树人工林土壤氮、磷的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- DU Y N. Effects of Biogas Slurry and Biochar Applications on Soil Nitrogen and Phosphorus in the Poplar Plantation in a Coastal Area, China [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [20] 孟清波, 田佳, 李青云, 等. 施用沼渣沼液肥对PEG渗透胁迫下辣椒幼苗生理特性的影响 [J]. 中国瓜菜, 2020, 33(9): 28-33.
- MENG Q B, TIAN J, LI Q Y, et al. Effect of biogas slurry fertilizer on physiological characteristics of pepper seedlings under PEG osmotic stress [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2020, 33(9): 28-33.
- [21] 陆国弟, 侯嘉, 杨扶德, 等. 沼液还田对蒙古黄芪生长及质量的影响 [J]. 草业科学, 2025, 42(3): 719-732.
- LU G D, HOU J, YANG F D, et al. Effects of returning biogas slurry to fields on the growth and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 719-732.
- [22] 蒋守华, 陈香华, 周刚, 等. 沼液对日光温室黄瓜农艺性状及产量的应用效果分析 [J]. 金陵科技学院学报, 2018, 34(3): 68-71.
- JIANG S H, CHEN X H, ZHOU G, et al. Effects of Biogas Liquid on Agronomic Characters and Yield of Cucumber in Solar Greenhouse [J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2018, 34(3): 68-71.
- [23] 高浪涛. 连年施用无害化沼液农田土壤相关元素含量特征研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
- GAO L T. Study on the content characteristics of related elements in farmland soil after continuous application of harmless biogas slurry [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024.
- [24] 赵国华, 潘先庭, 沈赟芸, 等. 不同有机物料施用年限对设施菜地土壤养分和重金属含量的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(5): 509-513.
- ZHAO G H, PAN X T, SHEN Y Y, et al. Effect of Different Organic Materials Application Years on Soil Nutrient and Heavy Metal Content of Vegetable Soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 35(5): 509-513.