



刘变, 黄洁, 霍云霞, 等. 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤肥力及菜品品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(4): 909–921.

LIU B, HUANG J, HUO Y X, et al. Effects of fermented biogas slurry of tail vegetables instead of chemical fertilizer on planting soil fertility and quality of Chinese baby cabbage[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2025, 47(4): 909–921.

尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤肥力及菜品品质的影响

刘 变, 黄 洁, 霍云霞, 李 泽, 褚 润*

(甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】研究尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤肥力及菜品品质等的影响, 筛选尾菜发酵沼液替代化肥施用的最佳比例, 为解决高原夏菜主产区尾菜处置难题、提升土壤肥力及娃娃菜优质栽培提供理论基础和科学依据。【方法】以“金童”娃娃菜为试验材料, 于2023和2024年连续开展了2年田间定位试验, 在等氮量条件下设置CK(0%沼液, 常规化肥处理)、T₁(25%沼液+75%化肥)、T₂(50%沼液+50%化肥)、T₃(75%沼液+25%化肥)、T₄(100%沼液)5个处理, 分析不同沼液用量对土壤肥力及娃娃菜品质、产量等的影响。【结果】沼液替代化肥处理下土壤有机质含量显著升高且连续2年施用存在累计叠加效应。与CK处理相比, T₁~T₄处理下2年土壤有机质含量增幅分别为6.28%~22.77%、36.73%~52.01%; 沼液替代化肥处理可显著提高土壤全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量, pH呈上升趋势; 沼液替代75%化肥处理下娃娃菜可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素C含量均最佳, T₁~T₄处理下2年娃娃菜维生素C含量较CK处理均显著增加, 增幅分别为38.18%~66.08%、37.73%~57.46%; 可滴定酸随着沼液替代量的增加呈下降趋势但无显著变化; 各沼液处理下2年娃娃菜硝酸盐含量均低于常规施肥, 降幅分别为16.53%~43.73%、13.36%~38.39%; 随着沼液替代比例增加, 娃娃菜产量呈现先增加后降低的趋势, T₃处理下2年娃娃菜产量均达最高, 较CK处理分别显著增产27.81%、23.05%; 沼液替代化肥处理可节省肥料投入成本并提高娃娃菜经济效益。T₃处理下2年娃娃菜收入均达最高, 较CK处理分别增加29.0%、23.4%, 产投比最高, 且均为53.0。【结论】综合考虑土壤肥力、娃娃菜品质等因素, 尾菜发酵沼液替代75%化肥还田(T₃)为最优施肥处理。

关键词: 尾菜发酵沼液; 土壤肥力; 娃娃菜; 品质

中图分类号: S158 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2025)04-0909-13

CSTR: 32399.14.aauj.2025078

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of fermented biogas slurry of tail vegetables instead of chemical fertilizer on planting soil fertility and quality of Chinese baby cabbage

LIU Bian, HUANG Jie, HUO Yunxia, LI Ze, CHU Run*

收稿日期: 2024-12-10 修回日期: 2025-02-21

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(25YFNA044)

Project supported by the Science and Technology Plan Project of Gansu Province-Key Research and Development Program(25YFNA044)

作者简介: 刘变, 硕士生, orcid.org/0009-0008-4545-191X, 3357991682@qq.com; *通信作者: 褚润, 副教授, 博士, 主要从事废弃物资源化利用与植物逆境生理生态研究, orcid.org/0000-0001-9193-8894, churun3@126.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The study aims to investigate the effects of using vegetable waste fermentation biogas slurry to replace chemical fertilizers on the soil fertility of Chinese cabbage (*Brassica rapa var. pekinensis*) cultivation and the quality of the cabbages. It also seeks to screen out the optimal replacement ratio of chemical fertilizers with the biogas slurry. This research provides a theoretical basis and scientific evidence for solving the difficult problem of disposing of vegetable waste in the main production areas of high-altitude summer vegetables, improving soil fertility, and achieving high-quality cultivation of Chinese cabbages. [Method] “Jintong” Chinese baby cabbage were used as the test material, and the field positioning experiment was conducted for two consecutive years in 2023 and 2024, and five treatments were set up under the condition of equal nitrogen amount, including five treatments, namely CK (0% biogas slurry, conventional chemical fertilizer treatment), T₁ (25% biogas slurry + 75% chemical fertilizer), T₂ (50% biogas slurry + 50% chemical fertilizer), T₃ (75% biogas slurry + 25% chemical fertilizer) and T₄ (100% biogas slurry), to analyze the effects of different biogas slurry dosage on soil fertility, the quality and yield of Chinese baby cabbage. [Result] The content of soil organic matter was significantly increased under the treatment of biogas slurry replacing chemical fertilizers and there was a cumulative stacking effect for two consecutive years of application. Compared with the CK treatment, the increase in soil organic matter content under T₁ to T₄ treatments ranged from 6.28% to 22.77% and 36.73% to 52.01%, respectively; Biogas slurry instead of chemical fertilizer treatment could significantly increase the contents of soil total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium, and the pH showed an upward trend; The soluble sugar, soluble protein and vitamin C contents of Chinese baby cabbage were the optimal under the treatment of 75% chemical fertilizer replacement by biogas slurry, and the vitamin C contents of Chinese baby cabbage in the two years under the treatment of T₁ to T₄ were significantly increased compared with the treatment of CK, with the increases of 38.18% to 66.08% and 37.73% to 57.46%, respectively; The titratable acid showed a decreasing tendency with the increase in the amount of replacement by biogas slurry, but there was no significant change; The nitrate contents of baby cabbage under all biogas slurry treatments were lower than that of conventional fertilization in the two years, and the decreases were 16.53%–43.73%, 13.36%–38.39%, respectively; With the increase of the proportion of biogas slurry substitution, the yield of Chinese baby cabbage showed a trend of increasing and then decreasing, and the yield of Chinese baby cabbage reached the highest in both years under T₃ treatment, with a significant increase in yield of 27.81% and 23.05% respectively compared with CK treatment; Biogas slurry replacing chemical fertilizer treatment can save the cost of fertilizer inputs and improve the economic efficiency of Chinese baby cabbage. The highest income of Chinese baby cabbage was obtained in two years under T₃ treatment, which increased by 29.0%, 23.4%, respectively, compared with CK treatment, and the highest production/input ratio was 53.0 in both cases. [Conclusion] Considering factors such as soil fertility and the quality of baby Chinese cabbages, the fertilization treatment of returning vegetable waste fermentation biogas slurry to the field to replace 75% of chemical fertilizers (T₃) is the optimal one.

Keywords: fermented biogas slurry of tail vegetables; soil fertility; baby cabbage; quality

【研究意义】随着人民生活水平的提高和现代农业的快速发展,我国蔬菜消费水平显著提升,蔬菜发展成为仅次于粮食的第二大农作物^[1]。甘肃省依托区域资源优势,紧盯市场需求,已发展成为高原夏菜主产区。据统计,2023年甘肃省蔬菜产量、面积分别为1 822.6万t、48.6万hm²,分别比2022年增长5%、7%^[2]。在蔬菜产业快速发展的同时,蔬菜生产、采收、运输、加工、销售等过程中会产生大量不能作为商品流通的蔬菜废弃物(尾菜),其含水率高^[3],保存期短,且生产高峰期一般处于高温季节^[4-5],若随意堆放在田间地头等地,易腐烂发臭并滋生蚊蝇,从而增大疾病传播风险^[6]。尾菜在腐烂变质过程中产生的亚硝酸盐会污染土壤进而影响蔬菜生长,散发的臭气也会影响周围农业生产环境。此外,为保证蔬菜产量

而长期过量施用化肥,尤其是氮肥,极易引起土壤硝态氮的过度累积,造成土壤养分失调、肥料利用率降低、土壤酸化、蔬菜品质下降等问题^[7-11]。鉴于尾菜污染环境的负面效应及施肥不当造成的土壤地力下降问题,寻求科学合理的尾菜处置方式和施肥模式具有重要的现实意义。【前人研究进展】尾菜含有较高有机质和多种营养元素,具有极高回收利用价值,经无害化处理和资源化利用后可变废为宝^[12]。经厌氧发酵产生的沼液作为有机肥料还田能有效解决尾菜处理难的问题,避免沼液排放带来的环境污染风险^[13]。沼液富含有机质、N、P、K、微量元素以及氨基酸等物质^[14-15],与化肥配施还田既能减少化肥施用成本,还可改善土壤养分资源,提高土壤肥力,增加作物抗逆、抗病能力,从而提高作物产量和品质^[16-19]。因畜禽粪便发酵液中含有大量重金属元素和抗生素等有害成分,其连年还田存在重金属安全风险^[20],而尾菜发酵沼液中基本无重金属和抗生素污染,其农用潜力巨大。吴树彪等^[21]研究发现,沼液虽能增产提质,但其施用量并非越多越好。尾菜发酵沼液的合理利用,对于发展蔬菜产业,实现以养分循环为基础的绿色农业发展模式和节约型社会建设以及生态环境保护具有重大意义。因此,沼液的合理施用成为当前的研究热点之一。

【本研究切入点】目前关于沼液还田对土壤肥力的影响及其在农作物上应用效果的研究多以畜禽粪便沼液还田为主,有关尾菜发酵沼液还田的研究较少,而关于尾菜发酵沼液替代化肥连年施用对土壤肥力及作物品质影响的研究更鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究通过2年大田试验,明确尾菜发酵沼液替代化肥对土壤肥力的影响及在娃娃菜上的应用效果,旨在为蔬菜产区尾菜处置、土壤肥力及娃娃菜品质提升提供理论依据,进而推动蔬菜产业发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃省金昌市永昌县东寨镇红光村元生2号牧场内进行(38°27'N, 102°09'E, 耕地海拔1 841.16 m)。该地区年平均气温4.8℃,年平均日照2 884.2 h,年降雨量185 mm,年蒸发量2 000.6 mm,无霜期134 d,为典型的温带干旱大陆性气候。试验前测得0~20 cm耕层土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾含量分别为22.91 g/kg、1.24 g/kg、72.80 mg/kg、0.20 g/kg、28.97 mg/kg、205 mg/kg, pH值7.8。

1.2 试验材料

娃娃菜:选用当地常规品种“金童”,购自北京大久韩日种业有限公司,生育期约60 d。

尾菜发酵沼液:取自甘肃元生农牧科技有限公司1号牧场,原料以尾菜为主。沼液基本理化性质:2023年pH 7.35,有机质16.27 g/kg,全氮0.532 g/kg,全磷0.028 g/kg,全钾1.99 g/kg。2024年pH 7.48,有机质14.89 g/kg,全氮0.525 g/kg,全磷0.024 g/kg,全钾1.87 g/kg。

化肥:尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 18%)、硫酸钾(K₂O 50%),由永昌县农业技术推广服务中心提供。

1.3 试验设计

试验周期为2年(2023、2024年),每年只种一季娃娃菜,两季娃娃菜种植条件、管理方式相同且与当地管理措施一致,一季种植结束后进行休耕处理。两季娃娃菜生育期均为5—7月。小区随机分布,试验设置5个处理,100%化肥(CK)、沼液替代化肥的25%(T₁)、50%(T₂)、75%(T₃)、100%(T₄),每个处理3次重复,每个处理小区面积为20 m²(6.46 m×3.10 m),小区周边设有保护行。试验采用膜下滴灌、露地直播的种植模式,株行距为25 cm×30 cm,种植密度127 500株/hm²。根据当地施肥习惯,两季娃娃菜氮肥的17%在播种前(5月28日、5月15日)作基肥施入,其余作为追肥于娃娃菜苗期(6月12日、5月30日)、莲座期(6月23日、6月10日)、结球初期(7月1日、6月18日)和结球中期(7月11日、6月28日)施入,分别占总氮量的45%、14%、10%、14%,施肥用量见表1。

1.4 测定指标与方法

土样采集与测定:利用“S”型五点取样法,将土样充分混匀后,用四分法留样,土样经自然风干、研磨、过筛后备用。待测土样指标(土壤pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾)均参考鲁如坤^[22]所述的电位法、重铬酸钾-外加热法、凯氏定氮法、碱解扩散法、碳酸氢钠法、乙酸铵提取法进行测定。

娃娃菜品质指标测定:随机在各小区内选取4棵娃娃菜,利用四分法留样。可溶性糖、可溶性蛋白

表 1 试验处理及施肥情况
Tab.1 Experimental treatment and fertilization situation

处理 Treatment	沼液供氮/(kg·hm ⁻²) Nitrogen supply from biogas slurry	化肥供氮/(kg·hm ⁻²) Nitrogen supply from chemical fertilizers	总施氮量/(kg·hm ⁻²) Total nitrogen application rate
CK	0	174.0	174.0
T ₁	43.5	130.5	174.0
T ₂	87.0	87.0	174.0
T ₃	130.5	43.5	174.0
T ₄	174.0	0	174.0

质、维生素 C 均参考李合生^[23]所述的蒽酮比色法、考马斯亮蓝 G-250 染色法、2,6-二氯酚法测定;可滴定酸采用酸碱中和滴定法^[24]测定;硝酸盐参照 NY/T 1279—2007 测定。

娃娃菜产量指标测定:在采收期,去除娃娃菜不可食用部分,分小区单独称量、测产,并根据小区面积、产量折算每公顷产量。

1.5 数据处理与分析

试验数据在 Excel 2007 中进行整理,用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Pearson 相关性分析,采用 Duncan's 新复极差方法($P<0.05$)进行差异显著性分析,采用主成分分析法进行综合评价,使用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤肥力的影响

2.1.1 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤有机质的影响

由图 1 可知,沼液替代化肥施用可显著提高土壤有机质含量,2 年均随着沼液用量的增加呈现先升高后降低的变化趋势。2023 年沼液施用下,与 CK 处理相比,T₂、T₃、T₄ 处理下土壤有机质含量显著增加($P<0.05$),增幅为 15.23%~22.77%,但 T₂、T₃、T₄ 处理间无显著差异,且 T₁ 与 CK 无显著差异;2024 年沼液施用下,与 CK 处理相比,T₁~T₄ 处理下土壤有机质含量显著增加($P<0.05$),增幅为 36.73%~52.01%;2024 年各沼液处理下有机质含量均高于 2023 年,分别提高 24.43%、20.99%、19.74%、16.68%,但 2024 年常规施肥处理下有机质含量比 2023 年低 3.29%。

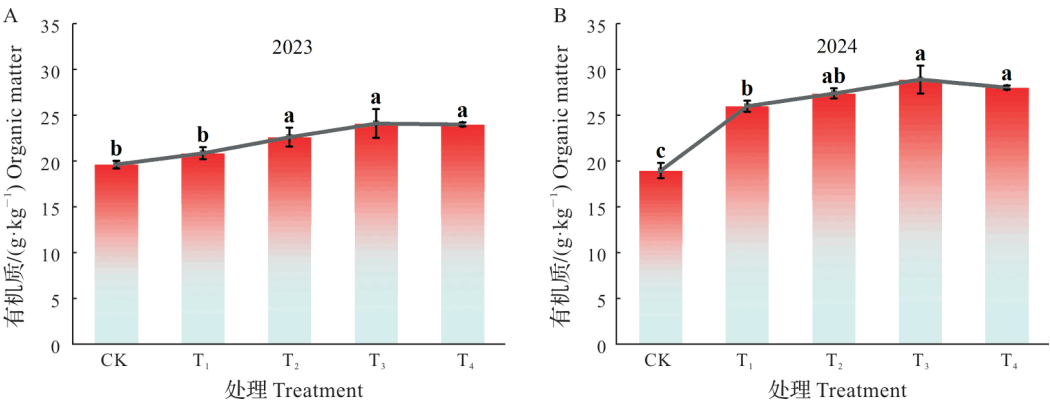


图 1 沼液施用对土壤有机质的影响
Fig.1 Effect of biogas slurry application on soil organic matter

2.1.2 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤养分的影响

由表 2 可知,沼液替代化肥对娃娃菜耕层土壤(0~20 cm)养分的影响在 2 年均表现出相似的变化趋势。土壤全氮含量随着沼液施用量的增加而提高。T₂、T₃、T₄ 处理下 2 年全氮含量较 CK 处理显著增加,增幅分别为 15.93%~24.78%、13.95%~23.26%,其中 T₄ 处理下 2 年全氮含量均达最高。随着沼液替代化肥比例增加,土壤碱解氮和速效磷含量呈先升高后降低的变化趋势,且二者含量峰值均出现在 T₃ 处理。与 CK 处理相比,T₁~T₄ 处理下 2 年碱解氮含量分别显著增加 3.04%~8.88%、3.31%~8.63%,速效磷含量分别

显著增加5.46%~18.12%、4.29%~15.78%。沼液替代化肥可显著提高土壤速效钾含量。T₂、T₃、T₄处理下2年速效钾含量较CK处理显著增加,增幅分别为3.18%~24.88%、4.38%~24.4%,其中T₄处理下2年速效钾含量最高,较其他处理分别显著提高20.91%~29.25%、18.54%~25.05%。土壤pH随着沼液用量的增加有上升趋势。2023年沼液施用下,T₄处理较CK处理可显著提高土壤pH值,增加0.12个pH单位。2024年沼液施用下,T₁、T₃、T₄处理较CK处理土壤pH值分别增加0.05、0.06、0.07个pH单位。

表 2 不同施肥处理下土壤养分的变化

Tab.2 Changes of soil nutrients under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	pH 值 pH value	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorous	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium
2023	CK	7.94±0.02 ^b	1.13±0.05 ^b	82.34±0.55 ^d	29.30±0.30 ^e	286.75±0.46 ^c
	T ₁	7.92±0.03 ^b	1.16±0.01 ^b	84.84±0.20 ^e	30.90±0.38 ^b	277.07±0.52 ^d
	T ₂	7.94±0.01 ^b	1.31±0.02 ^a	85.42±0.60 ^e	33.71±0.25 ^a	296.16±0.52 ^b
	T ₃	7.94±0.02 ^b	1.38±0.03 ^a	89.65±0.48 ^a	34.61±0.75 ^a	295.86±0.24 ^b
	T ₄	8.06±0.02 ^a	1.41±0.04 ^a	87.15±0.16 ^b	31.32±0.16 ^b	358.10±0.46 ^a
2024	CK	7.96±0.01 ^b	1.29±0 ^c	82.25±0.53 ^e	29.84±0.94 ^b	277.06±0.53 ^c
	T ₁	8.01±0 ^a	1.35±0.04 ^c	84.97±0.23 ^b	31.12±0.55 ^b	275.62±0.31 ^c
	T ₂	7.99±0.01 ^{ab}	1.47±0.05 ^b	85.91±0.59 ^b	33.97±0.42 ^a	289.20±0.48 ^b
	T ₃	8.02±0.01 ^a	1.53±0.03 ^{ab}	89.35±0.65 ^a	34.55±0.82 ^a	290.76±0.60 ^b
	T ₄	8.03±0 ^a	1.59±0.03 ^a	86.43±1.07 ^b	31.81±0.45 ^b	344.66±0.53 ^a

数据为平均值±标准误。同列数据后不同字母表示各处理之间差异显著(P<0.05)。

The data are averages ± standard errors. Different letters after the same column of data indicate significant differences between treatments(P<0.05).

2.2 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜品质的影响

由表3可知,娃娃菜可溶性糖、可溶性蛋白质、维生素C含量随着沼液替代比例的增加均呈先升高后降低的趋势。2023年沼液施用下,与CK处理相比,T₂、T₃处理下可溶性糖含量显著增加15.24%、24.7%,T₃处理下可溶性蛋白质含量显著增加16.27%,CK与其他处理无显著差异;2024年沼液施用下,与CK处理相比,T₃处理下可溶性糖含量显著增加21.29%,T₂、T₃、T₄处理下可溶性蛋白质含量显著增加11.37%~17.54%,CK与其他处理无显著差异;2023年沼液施用下,与CK相比,T₁~T₄处理下维生素C含量显著增加,增幅为38.18%~66.08%,T₃处理下维生素C含量最高,较其他处理显著提高10.52%~66.08%;2024年沼液施用下,与CK相比,T₁~T₄处理下维生素C显著增加,增幅为37.73%~57.46%,T₃处理下维生素C含量

表 3 不同施肥处理下的娃娃菜品质

Tab.3 Quality of baby cabbage under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	可溶性糖/% Soluble sugar	可滴定酸/% Titratable acid	可溶性蛋白质/(mg·g ⁻¹) Soluble protein	维生素C/(mg·kg ⁻¹) Vitamin C	硝酸盐/(mg·kg ⁻¹) Nitrate
2023	CK	3.28±0.10 ^e	0.25±0 ^a	2.09±0.03 ^{bc}	233.63±5.23 ^c	824.54±61.75 ^a
	T ₁	3.68±0.08 ^{abc}	0.24±0.02 ^{ab}	2.08±0.06 ^c	322.83±8.28 ^b	688.23±137.53 ^{ab}
	T ₂	3.78±0.08 ^{ab}	0.22±0.01 ^{ab}	2.25±0.05 ^{abc}	351.07±11.07 ^b	617.49±122.06 ^{ab}
	T ₃	4.09±0.07 ^a	0.20±0.01 ^b	2.43±0.08 ^a	388.02±4.23 ^a	530.37±97.77 ^{ab}
	T ₄	3.47±0.23 ^{bc}	0.21±0.02 ^{ab}	2.27±0.04 ^{ab}	337.69±19.92 ^b	463.94±16.39 ^b
2024	CK	3.10±0.06 ^b	0.29±0.02 ^a	2.11±0.02 ^c	233.73±5.29 ^c	842.52±33.95 ^a
	T ₁	3.32±0.05 ^{ab}	0.27±0.02 ^a	2.20±0.01 ^c	321.92±3.72 ^b	730.00±38.55 ^{ab}
	T ₂	3.48±0.22 ^{ab}	0.24±0.02 ^a	2.35±0.05 ^b	345.04±10.63 ^{ab}	673.17±92.70 ^{ab}
	T ₃	3.76±0.20 ^a	0.23±0.01 ^a	2.48±0.03 ^a	368.02±6.76 ^a	558.63±96.28 ^b
	T ₄	3.46±0.06 ^{ab}	0.23±0.02 ^a	2.38±0.04 ^{ab}	336.28±9.28 ^b	519.08±26.36 ^b

数据为平均值±标准误。同列数据后不同字母表示各处理之间差异显著(P<0.05)。

The data are averages ± standard errors. Different letters after the same column of data indicate significant differences between treatments(P<0.05).

最高,较CK、T₁、T₄处理显著提高9.44%~57.46%,与T₂无显著差异。可滴定酸随着沼液用量的增加呈下降趋势,但各处理间无显著差异。各沼液处理均降低了娃娃菜硝酸盐含量。T₁~T₄处理下2年硝酸盐含量较CK处理分别降低16.53%~43.73%、13.36%~38.39%,2年硝酸盐含量均以T₄处理最低,较CK处理分别显著降低43.73%、38.39%。

2.3 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜产量及经济效益的影响

2.3.1 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜产量的影响

沼液施用量的增加导致娃娃菜产量呈现出先升后降的趋势(图2)。2023年各处理下娃娃菜产量分别为42.07、36.77、40.72、53.77、41.07 t/hm²,2024年各处理下娃娃菜产量分别为41.95、39.69、41.74、51.62、41.42 t/hm²。T₃处理下2年娃娃菜产量均达到最高且较CK、T₁、T₂、T₄显著增加,分别增产27.81%、46.23%、32.05%、30.92%和23.05%、30.06%、23.67%、24.63%。

2.3.2 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜经济效益的影响

结合娃娃菜产量、市场价和氮肥成本,不同施肥处理对娃娃菜经济效益的影响见表4。随着沼液用量的增加,娃娃菜收入和产投比呈先升高后降低的趋势。2023、2024年沼液替代75%化肥处理(T₃)下娃娃菜收入均最高,较CK分别增加29.0%、23.4%,产投比最高,且均为53.0。

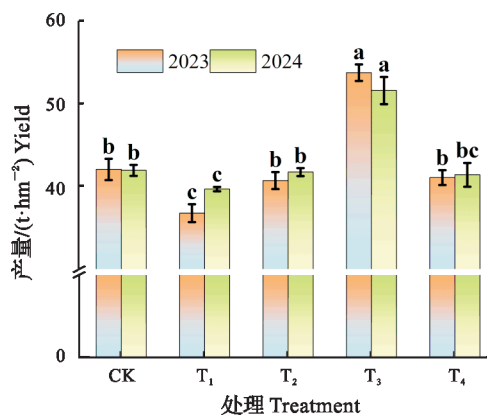


图2 沼液施用对娃娃菜产量的影响

Fig.2 Effect of biogas slurry application on the yield of baby cabbage

表4 不同施肥处理对娃娃菜经济效益的影响

Tab.4 Effects of different fertilization treatments on the economic benefits of baby cabbage

年份 Year	处理 Treatment	产量/(t·hm ⁻²) Yield	产值/(元·hm ⁻²) Output value	氮肥成本/(元·hm ⁻²) Nitrogen fertilizer cost	收入/(元·hm ⁻²) Revenue	产投比 Production-to-investment ratio
2023	CK	42.07	43 752.8	1 218.0	42 534.8	34.9
	T ₁	36.77	38 240.8	1 157.1	37 083.7	32.0
	T ₂	40.72	42 348.8	1 096.2	41 252.6	37.6
	T ₃	53.77	55 920.8	1 035.3	54 885.5	53.0
	T ₄	41.07	42 712.8	974.4	41 738.4	42.8
2024	CK	41.95	41 950.0	904.8	41 045.2	45.4
	T ₁	39.69	39 690.0	922.2	38 767.8	42.0
	T ₂	41.74	41 740.0	939.6	40 800.4	43.4
	T ₃	51.62	51 620.0	957.0	50 663.0	53.0
	T ₄	41.42	41 420.0	974.4	40 445.6	41.5

根据市场调研,2023、2024年娃娃菜市场价为1 040元/t、1 000元/t,化学氮分别为7元/kg、5.2元/kg,沼液氮均为5.6元/kg。

According to market research, the market price of baby cabbage in 2023 and 2024 is 1 040 yuan/t and 1 000 yuan/t, chemical nitrogen is 7 yuan/kg and 5.2 yuan/kg, biogas slurry nitrogen are all 5.6 yuan/kg.

2.4 娃娃菜品质、产量与土壤养分的关系及综合评价

对不同沼液还田处理下娃娃菜指标与土壤养分进行相关性分析(图3)可知,可溶性糖与有机质、全氮、碱解氮、速效磷呈显著正相关;可滴定酸与有机质、全氮呈显著负相关;可溶性蛋白质、维生素C除与速效钾相关性不强,与其他各土壤指标均有不同程度的正相关关系;硝酸盐与土壤养分呈显著负相关;娃娃菜产量与速效磷、碱解氮呈显著正相关。同时,有机质与其他土壤养分指标相关性较高,这表明有

机质对其他矿质元素的含量有直接或间接影响,提高有机质含量可显著提升土壤肥力水平。碱解氮与速效磷、全氮与碱解氮、速效钾均呈显著正相关,表明各养分指标在土壤中并非单独存在,而是相互促进共同发挥作用,最终影响娃娃菜产量、品质。

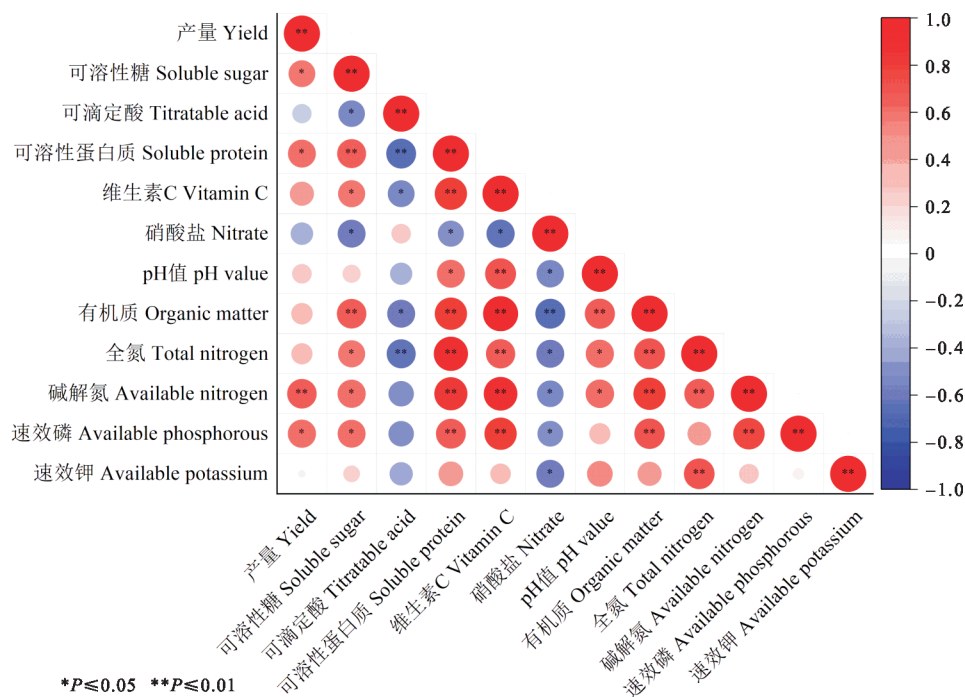


图3 娃娃菜产量、品质与土壤养分的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between yield and quality of baby cabbage and soil nutrients

基于同一沼液梯度处理下土壤养分指标及娃娃菜品质、产量无法同时达到最优,故对不同处理各项指标进行综合评价。本研究选取沼液施用2年后娃娃菜收获期可溶性糖、可溶性蛋白质、维生素C、产量及土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾共9个指标进行主成分分析,共提取出2个特征值大于1的主成分,累计贡献率达到81.400%(表5)。

表5 主成分分析的特征值、方差贡献率

Tab.5 Eigenvalues and variance contribution rates of principal component analysis

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	提取特征值 Extractive eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Cumulative contribution rate
1	5.926	65.842	65.842	5.926	65.842	65.842
2	1.400	15.558	81.400	1.400	15.558	81.400
3	0.655	7.279	88.679			
4	0.469	5.209	93.888			
5	0.253	2.809	96.697			
6	0.179	1.993	98.690			
7	0.085	0.942	99.632			
8	0.020	0.221	99.853			
9	0.013	0.147	100.000			

根据提取出的主成分及各自的贡献率计算得出综合得分由高到低依次为:T₃、T₄、T₂、T₁和CK(图4)。综合评价结果表明:T₃处理下(75%沼液+25%化肥)土壤肥力及娃娃菜品质、产量提升的综合效果最佳。

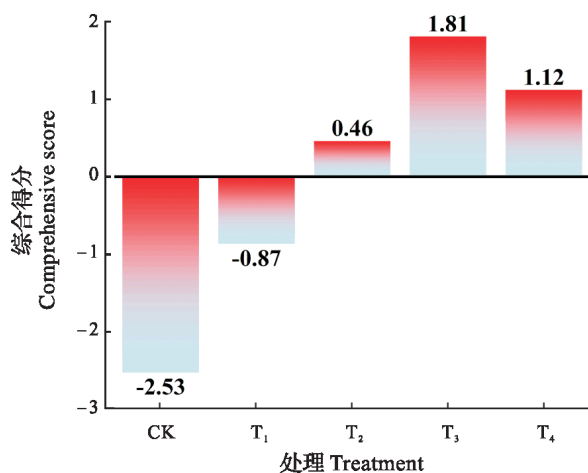


图 4 不同施肥处理的综合得分

Fig.4 Comprehensive score of different fertilization treatments

3 讨 论

3.1 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜种植土壤肥力的影响

土壤有机质含量对作物和土壤至关重要,不仅能提供作物生长所需的养分,而且在维持土壤团聚体结构和稳定性、保持土壤肥力和缓冲性能等方面具有重要作用。沼液连续 2 年替代化肥施用后土壤有机质变化规律表明,随着施肥年限的增加 CK 处理下有机质含量降低,这与作物连作或者长期施用化肥有关,其中化肥施用对有机质含量影响程度更明显。研究表明,施入化肥后会刺激土壤中某些微生物加快自身的代谢活动,从而使有机质分解速度加快^[25],由于 CK 处理在氮素投入的同时无有机物的投入,娃娃菜生长仅能消耗土壤原有碳素,导致有机质含量降低。本研究表明,各沼液处理下土壤有机质含量显著提高,且 2024 年各沼液用量下有机质含量均高于 2023 年,这与黄继川等^[26]发现的稻田土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量随着沼液施用量增加而提高且持续施用沼液存在累积叠加效应的结论相似。

土壤养分是土壤肥力的重要组成部分,它决定土壤能够提供给植物的营养元素的种类和数量,影响作物的生长发育。本研究发现,沼液连续 2 年替代化肥还田后土壤全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量均显著提升。因沼液本身富含 N、P、K 营养元素及有机质等,合理施用能提高土壤微生物的活性,活化土壤养分,从而使土壤中的营养物质得到有效利用^[27-28]。叶伟宗等^[29]和唐华等^[30]的研究表明土壤全氮含量等的提升程度与沼液施用量呈正相关关系。本研究也发现,随着沼液替代化肥比例的增加,土壤全氮含量逐渐升高并表现为不同程度积累,原因可能是沼液与化肥配施能给作物提供更多有效的养分,在促进娃娃菜生长发育的同时,残留在土壤中的大量根茬和茎叶残体经微生物分解后又返回土壤中,从而提高了土壤氮素水平^[31]。沼液施入后,土壤速效养分含量显著增加,这可能与沼液自身携带的有机酸离子对土壤固相界面上专性吸附位点进行竞争性吸附,进而减弱土壤矿物的固持能力^[32]有关。土壤 pH 值是影响土壤肥力的一个重要指标,适宜的土壤酸碱度范围能为植物提供更好的土壤环境和条件且有利于植物的生长发育。本研究发现,土壤 pH 随着沼液用量和施肥年限的增加有上升趋势,这可能是由于供试土壤本身偏碱性(7.8)、娃娃菜生长周期短而沼液短期内大量施用的结果。研究表明,与施用化肥相比,沼液施用 1 年对 pH 无显著影响,施用 2 年后 pH 降低,而施用 3 年后与其原有 pH 持平,这说明施用沼液具有维持土壤微生态环境的稳定性作用^[33]。本研究沼液仅施用了 2 年,土壤环境远未达到稳定状态,后续 pH 变化情况仍需进一步研究。

3.2 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜品质的影响

可溶性糖是人维持生命活动所必需的能源物质,可滴定酸是蔬菜中参与调节人体内酸碱平衡的有机酸,二者共同影响蔬菜的贮存、运输、品质、食用口感以及营养价值。糖酸比是衡量蔬菜口感和风味的

重要指标之一,其含量适中时蔬菜口感会更加鲜美爽口^[34]。可溶性蛋白质是蔬菜生长发育、代谢调节以及品质形成的关键因子。通过食用富含维生素C的蔬菜能够提高人体免疫力和抗氧化能力^[35]。硝酸盐在人体内可被转化为具有致癌作用的亚硝酸盐,是评价蔬菜食用安全性的重要指标^[36]。研究表明,蔬菜尤其是叶菜类蔬菜易富集硝酸盐,是人体硝态氮的主要来源^[37]。鉴于此,本研究选用以上5个指标作为娃娃菜品质的评价指标。

目前诸多学者对沼液还田后蔬菜的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C等含量的变化情况已进行大量研究,但结论并不一致。杨合法等^[38]认为,单施化肥番茄果实维生素C含量较低,可溶性糖含量降低、有机酸含量升高,而沼肥还田后维生素C、糖酸比较等养分化肥处理分别增加15.37%、28.49%,改善了果实风味;不同用量沼液施用使茼蒿叶和生菜硝酸盐含量明显降低,而导致茼蒿茎硝酸盐含量升高^[39];李会合等^[40]研究表明施用沼液可降低木耳菜硝酸盐、可溶性糖和维生素C的含量。本研究结果表明,随着沼液用量的增加,娃娃菜可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素C含量呈先升高后降低的趋势,可滴定酸呈下降趋势但无显著变化,硝酸盐含量明显降低。维生素C的含量随沼液用量增加显著提高,以T₃处理效果最好,其原因可能是作为一种速效养分含量较高的液态有机肥,沼液对娃娃菜维生素C含量的影响可能取决于其所含的有机态成分。郭熙盛等^[41]的研究结果显示,蔬菜维生素C含量会随氮肥用量、种类、形态及配比等不同而有所变化,浇施硝态氮与铵态氮的比为25:75的营养液后白菜、油麦菜、生菜维生素C含量达到最大值^[42]。蔬菜含有的硝态氮主要来自于施入土壤的氮肥,因此其用量决定硝酸盐的累积程度,硝态氮在蔬菜中吸收与还原转化不平衡等因素也会对叶菜类蔬菜硝态氮的积累产生影响^[43]。齐英等^[44]发现在等氮量条件下施用适量沼肥或沼肥与化肥配合施用较单施化肥均可明显减少蔬菜内硝酸盐的积累,且随着沼肥比例加大硝酸盐含量呈下降趋势,全沼肥处理下硝酸盐含量最低,与本试验研究结果类似。娃娃菜硝酸盐含量随着沼液用量的增加而降低,100%沼液处理下娃娃菜硝酸盐含量最低,这可能是因为沼液中含有的氨基酸能激活植株内的硝酸还原酶,从而取代部分硝态氮使作物体内硝酸盐含量降低^[45]。综合考虑,鉴于沼液自身的复杂性及蔬菜生长特性,沼液对蔬菜品质的影响机制较为复杂故难以定论,仍需进行深入研究。

3.3 尾菜发酵沼液替代化肥对娃娃菜产量及经济效益的影响

沼液作为一种养分含量丰富的液态有机肥,施入土壤不仅可节约化肥,其养分还可快速被植物吸收利用,从而促进作物生长并达到增产的目的。康婉青等^[46]研究表明,沼液替代25%化肥处理下能实现N、P、K与其他养分的有机结合,可提高青贮玉米产量,但沼液过量施用时会破坏土壤养分平衡,产量会有所下降。王桂良等^[47]发现当沼液替代化肥氮比例达到50%以上时,由于贪青晚熟等原因可能导致小麦出现倒伏、减产。从国内外已开展的大量关于沼液与无机肥配比对农作物增产效果的研究结果来看,大部分研究者认为沼液施用量并非越高越好,而是存在一个最佳配施比例。本研究发现娃娃菜产量随着沼液替代比例的增加呈现先升高后降低的趋势,在75%沼液+25%化肥处理下产量最高,这与黄红英等^[48]的研究结果一致。在100%沼液处理下产量降低的原因可能是沼液中含有大比例铵态氮(占总氮70%以上)^[49],氨挥发量随着沼液施用量增大而增大,从而造成等氮水平下全沼液处理部分氮素可能由于氨挥发而损失,引起氮素供应不足的问题^[50]。本研究通过分析不同施肥处理对娃娃菜经济效益的影响发现,沼液替代化肥施用不仅能降低氮肥投入成本,还可提高娃娃菜产量及经济效益,T₃处理下娃娃菜产量、收入和产投比均达最高,经济效益最佳。

4 结 论

尾菜发酵沼液替代化肥可显著改善娃娃菜种植土壤肥力。沼液替代化肥处理下土壤有机质含量显著增加且连续2年施用存在累积叠加效应,全氮、速效钾含量显著升高,土壤pH呈上升趋势,碱解氮、速效磷呈现先升高后降低趋势,且在沼液替代75%化肥处理下达到最高。

尾菜发酵沼液替代化肥可显著提升娃娃菜品质、产量及经济效益。随着沼液替代量的增加,娃娃菜可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素C含量呈现先升高后降低趋势,硝酸盐含量显著降低,可滴定酸呈下

降趋势,但各处理间无显著变化,产量呈现先升高后降低的趋势,且在 T_3 处理下2年产量、收入、产投比均达最高。

综合评价结果表明,75%尾菜发酵沼液替代化肥处理(T_3)在改善土壤肥力、提升娃娃菜品质与产量及经济效益方面的综合效果最佳。

致谢:甘肃农业大学科技创新基金-青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2022-16)和兰州市科技发展计划-科技重大专项(2024-2-14)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 李哲敏,任育锋,张小允.改革开放以来中国蔬菜产业发展及趋势[J].中国农业资源与区划,2018,39(12):13-20.
LI Z M, REN Y F, ZHANG X Y. Development and trend of vegetable industry in China since reform and opening-up[J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2018, 39(12): 13-20.
- [2] 甘肃省统计局,国家统计局甘肃调查总队.2023年甘肃省国民经济和社会发展统计公报[N].甘肃日报,2024-03-20(006).
Gansu Provincial Bureau of Statistics, Gansu Survey Team of National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economy and social development of Gansu Province in 2023[N]. Gansu daily, 2024-03-20(006).
- [3] 韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等.不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J].农业资源与环境学报,2015,32(4):377-382.
HAN X, CHANG R X, DU P X, et al. Straw coefficient and properties of different vegetable wastes[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2015, 32(4): 377-382.
- [4] 宋荣平.陆良县蔬菜废弃物沼液施肥应用效果及推广策略研究[D].昆明:云南师范大学,2023.
SONG R P. Application effect and promotion strategy of vegetable waste biogas slurry fertilization in Luliang County [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023.
- [5] 杜鹏祥,韩雪,高杰云,等.我国蔬菜废弃物资源化高效利用潜力分析[J].中国蔬菜,2015(7):15-20.
DU P X, HAN X, GAO J Y, et al. Potential analysis on high efficient utilization of waste vegetable resources in China[J]. China vegetables, 2015(7): 15-20.
- [6] 杨祎程,杨建,郭蓉,等.高原夏菜尾菜资源化利用现状及建议[J].农业科技与信息,2023(8):81-85.
YANG Y C, YANG J, GUO R, et al. Present situation and suggestions on resource utilization of plateau summer-wasting vegetables[J]. Agricultural science-technology and information, 2023(8): 81-85.
- [7] 蔡祖聪,颜晓元,朱兆良.立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):1-6.
CAI Z C, YAN X Y, ZHU Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2014, 20(1): 1-6.
- [8] AHMED M, RAUF M, MUKHTAR Z, et al. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health[J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24(35): 26983-26987.
- [9] 柳文凯,雷永忠,王莉,等.化肥减量配施生物有机肥对高原夏季露地大白菜生长生理及养分吸收的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(2):340-355.
LIU W K, LEI Y Z, WANG L, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with bio-organic fertilizer application on growth physiology and nutrient absorption of Chinese cabbage in open fields on plateau in summer[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 340-355.
- [10] 赵子婧,孙建平,戴相林,等.秸秆还田结合减量施肥对水稻产量和土壤养分的影响[J].江苏农业科学,2022,50(10):66-71.
ZHAO Z J, SUN J P, DAI X L, et al. Effects of straw returning to field combined with reduced fertilization on rice yield and soil nutrients[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(10): 66-71.
- [11] 陈星月,孙毛毛,付鹏鸿,等.有机肥替代部分化肥对橘园土壤肥力和金秋砂糖橘果实品质及产量的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1186-1195.
CHEN X Y, SUN M M, FU P H, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on soil fertility in citrus orchard and fruit quality and yield of citrus reticulata 'Jinqiushatangju' [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(5): 1186-1195.
- [12] 孙可欣,国冉冉,王子铭,等.蔬菜废弃物资源化高效利用方式分析[J].中国农学通报,2023,39(5):92-99.

- SUN K X, GUO R R, WANG Z M, et al. Efficient resource utilization of vegetable waste[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2023, 39(5): 92-99.
- [13] CHEN G, ZHAO G H, ZHAO H M, et al. Biogas slurry use as N fertilizer for two-season *Zizania aquatica* Turcz. in China[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2017, 107(3): 303-320.
- [14] 贾亮亮, 赵京奇, 杨晨璐, 等. 追施沼肥对番茄生长、产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(6): 897-905.
- JIA L L, ZHAO J Q, YANG C L, et al. Effect of topdressing biogas fertilizer on growth, yield and quality of tomato[J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(6): 897-905.
- [15] 杨子森, 程彩虹, 张亚强, 等. 畜禽粪污沼液肥料化利用及优化途径[J]. 中国畜牧业, 2021(18): 28-30.
- YANG Z S, CHENG C H, ZHANG Y Q, et al. Fertilizer utilization and optimization of livestock and poultry manure biogas slurry[J]. China animal industry, 2021(18): 28-30.
- [16] 柴彦君, 张睿, 江建锋, 等. 沼液化肥配施对芦笋地土壤肥力及芦笋品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 120-127.
- CHAI Y J, ZHANG R, JIANG J F, et al. Effects of the combined biogas slurry with chemical fertilizer on soil fertility and asparagus quality in field[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2023, 39(5): 120-127.
- [17] YU F B, LUO X P, SONG C F, et al. Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality[J]. Acta agriculturae scandinavica, section B-soil and plant science, 2010, 60(3): 262-268.
- [18] IOCOLI G A, ZABALOY M C, PASDEVICELLI G, et al. Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: characterization, soil biological activity and growth dynamic of *Lactuca sativa* L.[J]. Science of the total environment, 2019, 647: 11-19.
- [19] 汪吉东, 马洪波, 高秀美, 等. 水葫芦发酵沼液对紫叶茼蒿生长和品质的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 787-792.
- WANG J D, MA H B, GAO X M, et al. Effects of different ratios of biogas slurry of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) substitute chemical nitrogen fertilizers on growth and quality of Lettuce (*L. sativa*) [J]. Soils, 2011, 43(5): 787-792.
- [20] 谢汉友, 董仁杰, 吴树彪, 等. 沼液与化肥配合基施对大棚番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 108-115.
- XIE H Y, DONG R J, WU S B, et al. Effect of biogas slurry combined with chemical fertilizer on the yield and quality of tomato growth in greenhouse[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2018(3): 108-115.
- [21] 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.
- WU S B, CUI C, ZHANG X Q, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(8): 118-125.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-14.
- LU R K. Soil agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 12-14.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 58-61.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 58-61.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 352-353.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 352-353.
- [25] GONG W, YAN X Y, WANG J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. Geoderma, 2008, 149(3): 318-324.
- [26] 黄继川, 徐培智, 彭智平, 等. 基于稻田土壤肥力及生物学活性的沼液适宜用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 362-371.
- HUANG J C, XU P Z, PENG Z P, et al. Biogas slurry use amount for suitable soil nutrition and biodiversity in paddy soil[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2016, 22(2): 362-371.
- [27] YU X Y, ZHU Y J, JIN L, et al. Contrasting responses of fungal and bacterial communities to biogas slurry addition in rhizospheric soil of poplar plantations[J]. Applied soil ecology, 2022, 175: 104427.
- [28] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rapeseed rotation ecosystem over 3 years[J]. Journal of soils and sediments, 2019, 19(5): 2534-2542.
- [29] 叶伟宗, 成国良, 陆宏, 等. 沼液对春毛豆产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 长江蔬菜, 2007(4): 54-55.

- YE W Z, CHENG G L, LU H, et al. Effects of biogas slurry on yield, quality and soil fertility of spring soybean[J]. Journal of Changjiang vegetables, 2007(4): 54-55.
- [30] 唐华, 郭彦军, 李智燕. 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.
- TANG H, GUO Y J, LI Z Y. Effects of slurry application on ryegrass growth and soil properties[J]. Acta agrestia Sinica, 2011, 19(6): 939-942.
- [31] 姜灿烂, 何园球, 李辉信, 等. 长期施用无机肥对红壤旱地养分和结构及花生产量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1102-1109.
- JIANG C L, HE Y Q, LI H X, et al. Effect of long-term inorganic fertilization on soil nutrient and structure and peanut yield in upland red soil[J]. Acta pedologica Sinica, 2009, 46(6): 1102-1109.
- [32] 章永松, 林咸永, 罗安程, 等. 有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究: I. 有机肥(物)对土壤不同形态无机磷的活化作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 145-150.
- ZHANG Y S, LIN X Y, LUO A C, et al. Studies on activation of phosphorus by organic manure in soils and its mechanisms I. activation of organic fertilizer on different forms of inorganic phosphorus in soil[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 1998, 4(2): 145-150.
- [33] 刘银秀, 池永清, 董越勇, 等. 不同沼液施用年限土壤养分含量和微生物群落结构差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 483-495.
- LIU Y X, CHI Y Q, DONG Y Y, et al. Variation of nutrient content and microbial community in soils under different application years of biogas slurry[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2023, 29(3): 483-495.
- [34] 王同林, 叶红霞, 郑积荣, 等. 番茄果实中主要风味物质研究进展[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(8): 1513-1522.
- WANG T L, YE H X, ZHEN J R, et al. Research progress of main flavor compounds in tomato fruits[J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(8): 1513-1522.
- [35] 袁鸿, 武玥, 王俊文, 等. 外源5-氨基乙酰丙酸对设施番茄果实发育及糖酸品质的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 107-117.
- YUAN H, WU Y, WANG J W, et al. Effects of exogenous 5-aminolevulinic acid on fruit development and sugar and acid quality of tomato in greenhouse[J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2022, 42(1): 107-117.
- [36] 王凤华, 赵田园, 李雨霏, 等. 双氰胺对樱桃萝卜硝酸盐积累及根系生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 133-138.
- WANG F H, ZHAO T Y, LI Y F, et al. Effects of dicyandiamide on root growth and nitrate accumulation of cherry radish[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2022(9): 133-138.
- [37] KARWOWSKA M, KONONIUK A. Nitrates/Nitrites in food-risk for nitrosative stress and benefits[J]. Antioxidants, 2020, 9(3): 241-258.
- [38] 杨合法, 范聚芳, 郝晋珉, 等. 沼肥对保护地番茄产量、品质和土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 369-372.
- YANG H F, FAN J F, HAO J M, et al. The research of marsh fertilizer impact on tomatoes output, quality and soil fertility in protected field[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2006, 22(7): 369-372.
- [39] 徐卫红, 王正银, 权月梅, 等. 沼液对莴笋和生菜硝酸盐含量及营养品质的影响[J]. 农村生态环境, 2003, 19(2): 34-37.
- XU W H, WANG Z Y, QUAN Y M, et al. Effect of application of biogas slurry on nitrate content and nutrition quality of lettuce and romaine lettuce[J]. Journal of ecology and rural environment, 2003, 19(2): 34-37.
- [40] 李会合, 叶学见, 王正银. 沼液对基质培木耳菜硝酸盐和营养品质的影响[J]. 中国沼气, 2003, 21(1): 37-39.
- LI H H, YE X J, WANG Z Y. Effect of biogas slurry on nitrate and nutrient quality of malabar spinach grown in medium culture[J]. China biogas, 2003, 21(1): 37-39.
- [41] 郭熙盛, 吴礼树. 施用氮钾肥料对蔬菜品质影响的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(6): 593-598.
- GUO X S, WU L S. The effect of N and K fertilizer on vegetable quality[J]. Journal of Huazhong agricultural university, 2002, 21(6): 593-598.
- [42] 侯迷红, 李玉明, 姚锦秋, 等. 不同氮素形态及其配比对叶类蔬菜生长和品质的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2016, 31(2): 137-140.
- HOU M H, LI Y M, YAO J Q, et al. Effects of different nitrogen form and their ratio on growth and quality of leafy vegetable

- [J].Journal of Inner Mongolia agricultural university(natural science edition),2016,31(2):137-140.
- [43] 王朝辉,田霄鸿,李生秀.叶类蔬菜的硝态氮累积及成因研究[J].生态学报,2001,21(7):1136-1141.
WANG Z H, TIAN X H, LI S X.The cause of nitrate accumulation in leafy vegetables[J].Acta ecologica Sinica,2001,21(7):1136-1141.
- [44] 齐英,陈慧民,刘慧.沼肥对减少蔬菜硝酸盐积累的量化研究[J].可再生能源,2003(5):16-17.
QI Y, CHEN H M, LIU H.A quantitative study on the use of methane to reduce the accumulation of nitrate in vegetables[J].Renewable energy resources,2003(5):16-17.
- [45] LIU X Q, KO K Y, KIM S H, et al.Enhancement of nitrate uptake and reduction by treatment with mixed amino acids in red pepper(*Capsicum annuum* L.)[J].Acta agriculturae scandinavica, section B-soil and plant science,2007,57(2):167-172.
- [46] 康婉青,徐娅玲,徐晓玲,等.不同沼液施用量对土壤养分和土壤细菌群落结构的影响[J].中国草地学报,2022,44(10):75-83.
KANG W Q, XU Y L, XU X L, et al.Effects of different biogas slurry application rates on soil nutrients and soil bacterial community structure[J].Chinese journal of grassland,2022,44(10):75-83.
- [47] 王桂良,张家宏,王守红,等.沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):467-475.
WANG G L, ZHANG J H, WANG S H, et al.Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and growth characteristics of winter wheat [J].Journal of agricultural resources and environment,2018,35(5):467-475.
- [48] 黄红英,曹金留,常志州,等.猪粪沼液施用对稻、麦产量和氮磷吸收的影响[J].土壤,2013,45(3):412-418.
HUANG H Y, CAO J L, CHANG Z Z, et al.Effects of digested pig slurry application on yields, nitrogen and phosphorous uptakes by rice and wheat[J].Soils,2013,45(3):412-418.
- [49] 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.
JIN H M, CHANG Z Z, YE X M, et al.Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2011,27(1):291-296.
- [50] 吴华山,郭德杰,马艳,等.猪粪沼液施用对土壤氨挥发及玉米产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(2):163-168.
WU H S, GUO D J, MA Y, et al.Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J].Chinese journal of eco-agriculture,2012,20(2):163-168.

(责任编辑:刘玉香)