中国农业大学学报 2024,29(8):86-94
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

娄雨,李艳,姜灵伟,李明新,王琦璋,马继涛,林聪,段娜. 不同浓度沼液及施用方式对小白菜生长效果的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(08):86-94.
LOU Yu, LI Yan, JIANG Lingwei, LI Mingxin, WANG Qizhang, MA Jitao, LIN Cong, DUAN Na. Effects of different concentrations and application methods of liquid digestate on the growth of Chinese cabbage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(08): 86-94.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.07

不同浓度沼液及施用方式对小白菜生长效果的影响

娄 雨[1] 李 艳[1] 姜灵伟[1] 李明新[2] 王琦璋[2] 马继涛[2] 林 聪[1] 段 娜[1*]
(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院/农业农村部设施农业工程重点实验室,北京 100083;
2. 三河市盈盛生物能源科技股份有限公司,河北 廊坊 065000)

摘 要 为解决目前沼气工程存在的沼液处理难、现代农业化肥施用过量的问题,将不同稀释比例的沼液进行微生物菌剂预处理,获得不同浓度沼液液体肥,探究不同浓度沼液及其施用方式(叶面喷施和浇灌)对盆栽小白菜生长指标、光合指标和品质指标的影响。结果表明:1)低浓度沼液通过叶面喷施可以促进小白菜的生长发育,施用稀释15~20倍的沼液效果最优;2)高浓度沼液通过浇灌方式能够明显提高小白菜的各项生长品质指标,效果优于仅施尿素的化肥处理组,最佳施用方案为稀释1.5倍;3)在相同氮素水平下,高浓度沼液浇灌对小白菜生长和品质的促进效果明显优于低浓度沼液叶面喷施。高浓度沼液具有可替代化肥的潜力,低浓度沼液可作为追肥施用,对作物养分起到一定的补充作用。利用微生物菌剂处理后的沼液液体肥栽培小白菜不仅可以显著提高其生长品质,还能够部分代替化肥施用,对农作物增收和保护环境都具有重要的现实意义。

关键词 沼液; 施用方式; 小白菜; 生长指标; 光合指标; 品质指标
中图分类号 S216.4;X713 **文章编号** 1007-4333(2024)08-0086-09 **文献标志码** A

Effects of different concentrations and application methods of liquid digestate on the growth of Chinese cabbage

LOU Yu[1], LI Yan[1], JIANG Lingwei[1], LI Mingxin[2], WANG Qizhang[2], MA Jitao[2], LIN Cong[1], DUAN Na[1*]
(1. College of Water Resources & Civil Engineering/ Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment of MOARA, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Sanhe Yingsheng Bioenergy Technology Co, Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract Aiming at the difficulty in liquid digestate treatment in current biogas plants and the problem of excessive application of chemical fertilizers in modern agriculture, this study pretreated liquid digestate with different dilution proportions by microbial inoculants to obtain liquid fertilizers with different concentrations of liquid digestate explored. The effects of different concentrations of liquid digestate and its application methods (leaf spraying and watering) on the growth indexes, photosynthetic indexes and quality indexes of potted cabbage were explored. The results showed that: Low concentration of liquid digestate promoted the growth and development of Chinese cabbage by foliar spraying, and applying liquid digestate with a dilution of 15 to 20 times was the best. High concentration liquid digestate significantly improved the growth and quality indexes of Chinese cabbage, and the effect was better than that of chemical fertilizer treatment group. The optimal application plan was diluted by 1.5 times. Under the same nitrogen level, the effect of high concentration liquid

收稿日期: 2023-07-26
基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52261145701);国家自然科学基金项目(51861125103)
第一作者: 娄雨(ORCID: 0009-0009-9969-8616),硕士研究生,E-mail:louyu1710@163.com
通讯作者: 段娜(ORCID:0000-0002-9834-4180),教授级高级工程师,主要从事农业废弃物资源化利用技术研究,E-mail:duanna@cau.edu.cn

digestate for irrigation on the growth and quality of Chinese cabbage was better than that of low concentration liquid digestate for foliar spraying. High concentration liquid digestate had the potential to replace chemical fertilizer, while low concentration liquid digestate could be used as a topdressing method to supplement nutrients. In conclusion, using liquid digestate pretreated by microbial agents as liquid fertilizer to cultivate Chinese cabbage can not only significantly improve its growth quality, but also reduce the application of chemical fertilizer. It has important practical significance for increasing crop income and protecting environment.

Keywords　liquid digestate; applying method; Chinese cabbage; growth index; photosynthetic index; quality index

近年来，随着社会主义新农村建设以及农业现代化的发展，我国农业生产趋于产业化、集约化。据估计，我国每年产生的农业废弃物量高达 7×10^9 t[1]。合理利用这些农业废弃物，将其转化为我国循环经济的“原料”，对促进我国农业绿色增产增效、改善我国生态环境具有重要意义[2]。

沼气技术作为农业废弃物处理的重要手段之一，不仅可显著提高农业废弃物的综合利用效率，还有利于发展绿色农业。沼液是沼气工程厌氧发酵的残余物，具有丰富的有机质、氨基酸及作物生长所必需的氮、磷、钾等营养元素[3]，同时还含有丰富的Ca、Fe和Zn等中微量元素，能促进作物生长，增强作物抗逆性，是一种含有多种生物活性物质且营养成分全面的优质有机肥[4-6]。但如果利用不当，将会影响农田环境，威胁农村生态环境，造成二次污染。因此，沼液安全高效农用是沼液消纳的主要途径。

为了减少化肥施用带来的不利影响，同时促进种养结合循环农业发展，越来越多的研究开始关注于沼液施用和替代化肥使用效果。目前沼液处理方法包括：物理化学法、自然生态处理法和生物处理法等[7]。沼液性质、处理方法以及施用方式的差异均会影响沼液的施用效果。杨雪妍等[8]比较了2种不同来源的厨余沼液原液（沼液A化学需氧量（Chemical oxygen demand，COD）质量浓度18 757.91 mg/L，沼液B-COD质量浓度63 900.33 mg/L）及不同稀释倍数对黄瓜和萝卜种子萌发的影响，结果表明沼液原液直接施用会抑制种子萌发，但抑制作用随稀释倍数的增加逐渐消失并转化为促进作用，其中沼液A稀释1 000倍时，黄瓜种子的活力指数综合效果最好。王树仁等[9]研究发现，施用清水稀释一倍的沼液对温室反季大叶芹菜增产效果最显著，产量比对照组（腐熟的猪粪）提高了48.10%。Wu等[10]通过设置不施肥、常规化肥和不同浓度沼液作为变量，研究沼液施用对油菜产量、品质的影响，结果发现沼液可以提高作物的品质和产量，沼液施用量在78 750～101 250 kg/hm^{2}时，其产量和品质较好，但过量施用沼液可能导致水和土壤环境污染。Xu等[11]利用微藻处理后的沼液灌溉大白菜，探究其农艺性状和营养品质等的变化，结果表明低质量浓度沼液（低于100 mg/L）可促进大白菜的生物量、根长和叶片数等指标增加，但较高质量浓度的沼液（COD浓度为278和473 mg/L）对大白菜的生长有抑制作用。目前微生物菌剂广泛应用于农业种植中，结合沼液的特性优势，利用复合微生物菌剂处理沼液生产多元化液体肥料具有良好的发展前景[12-13]。现有研究大多集中于直接通过清水稀释处理高质量浓度沼液，并探究其对农作物生长效果的影响，缺乏关于微生物菌剂处理后沼液对农作物生长效果的相关研究。因此，本研究以牛粪秸秆混合发酵工程沼液为研究对象，利用具有有机物去除效果协同效应的乳酸菌群、酵母菌群和芽孢杆菌群等为主要菌种的复合微生物菌剂处理沼液并将其作为肥料，通过小白菜盆栽试验，探究不同质量浓度沼液与施用方式对小白菜生长指标和品质的影响，以期为沼液高效安全农用提供参考，实现沼液资源化高效利用和种养结合绿色发展的目标。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于河北省三河市某沼气工程内进行，该区域为典型暖温带大陆性气候，年平均气温11.1 ℃，总降雨量为905.1 mm，年蒸发量1 681.9 mm，全年日照时数平均为2 870 h，历年平均无霜期183 d。

1.2　试验材料

供试沼液取自上述沼气工程的新鲜沼液。沼气工程采用中温发酵，原料为秸秆和牛粪等农业废弃物，沼液初始COD质量浓度为29 591.7 mg/L；

沼液pH为8.15,呈碱性;沼液总固体含量(TS)和挥发性固体含量(VS)分别为5.25%和59.66%(基于TS);悬浮物和氨氮质量浓度较高,分别为19 250和1 007.49 mg/L。将沼液按照COD质量浓度设置不同稀释处理组并采用微生物菌剂进行预处理[14]。微生物菌剂主要菌群为乳酸菌、酵母菌和芽孢杆菌等,母液浓度>1×10^8 CFU/g,微生物菌剂由北海市翰华生物技术有限公司生产。经微生物菌剂处理后的不同浓度沼液理化性质如表1所示。种植的作物品种为'四季小白菜'。

表1 微生物菌剂处理后不同浓度沼液理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of liquid digestate with different concentrations

沼液理化性质 Physical and chemical properties of liquid digestate	处理1 Treatment 1	处理2 Treatment 2	处理3 Treatment 3	处理4 Treatment 4	处理5 Treatment 5	处理6 Treatment 6	处理7 Treatment 7	处理8 Treatment 8
稀释倍数 Dilution factor	60	30	20	15	6	3	1.5	0
pH	4.26	4.46	4.50	4.88	5.50	5.78	6.50	6.85
COD质量浓度/(mg/L) COD mass concentration	248.11	396.00	570.94	648.63	1 986.56	4 598.00	8 311.33	11 921.22
总氮质量浓度/(mg/L) Total nitrogen mass concentration	190	280	530	660	1 230	1 360	1 650	1 900
总固体含量/% Total solid content	0.09	0.10	0.13	0.14	0.35	0.67	1.22	1.92
挥发性固体含量/% Volatile solid content	0.05	0.04	0.04	0.04	0.14	0.35	0.56	0.94
悬浮物质量浓度/(mg/L) Suspended solids mass concentration	207.67	370.33	486.67	620.67	1 827.00	3 594.67	8 350.00	10 700.00
浊度/NTU Turbidity	23.97	48.55	49.20	50.08	669.10	1 336.70	2 695.30	4 486.33

注:处理1~4分别对应沼液稀释至60、30、20和15倍,其COD质量浓度分别为500、1 000、1 500和2 000 mg/L;处理5~8分别对应沼液稀释至6、3、1.5倍和不稀释,其COD质量浓度分别为5 000、10 000、20 000和30 000 mg/L。下同。

Note: Treatments 1 to 4 correspond to diluting 60, 30, 20 and 15 times, respectively, and their corresponding COD concentrations are 500, 1 000, 1 500, and 2 000 mg/L, respectively; Treatments 5 to 8 correspond to diluting 6, 3, 1.5, and with no dilution, and their corresponding COD concentrations are 5 000, 10 000, 20 000, and 30 000 mg/L, respectively. The same below.

1.3 试验设计

试验采用盆栽试验,试验盆规格为51 cm×23 cm×16 cm。共设置10个处理,每个处理组设置3个平行。小白菜采用撒播方式播种在试验盆中,出芽后至小苗4片叶时进行间苗,生长期间定期浇水、依次轮换盆栽的位置,以保证生长条件一致。出苗5 d后使用沼液通过叶面喷施或浇灌的方式进行施肥,从定植到收获共计20 d。施氮量参考赵长盛等[15]的研究结果,所有组别按照相同的施氮量(1.8 g/盆)和土壤(16 kg/盆)进行施肥,其余用清水保持条件一致。考虑到不同浓度沼液的常规和适宜施用方式,低浓度沼液采用叶面喷施方式,高浓度沼液采取浇灌方式进行施加,具体方案见表2。处理组1~4为低COD质量浓度沼液组,采用叶面喷施;处理组5~8为高COD质量浓度沼液组,采用浇灌方式;CK组为清水对照组,N处理组为化肥对照组。

表 2　沼液叶面喷施/浇灌施肥方案

Table 2　Fertilization scheme of digestate for foliar spraying/irrigation

处理 Treatment	处理方法 Processing method	施肥方式 Applying method
CK	清水	每 2 d 喷施一次，每次 500 mL
N	尿素	加水稀释至 5 L，每 2 d 喷施一次
1	COD 500 mg/L	每 2 d 喷施一次，每次 950 mL
2	COD 1 000 mg/L	每 2 d 喷施一次，每次 640 mL
3	COD 1 500 mg/L	每 2 d 喷施一次，每次 340 mL
4	COD 2 000 mg/L	每 2 d 喷施一次，每次 270 mL
5	COD 5 000 mg/L	加水稀释 2 倍，每 4 d 浇灌一次，每次 580 mL
6	COD 10 000 mg/L	加水稀释 2 倍，每 4 d 浇灌一次，每次 530 mL
7	COD 20 000 mg/L	加水稀释 2 倍，每 4 d 浇灌一次，每次 440 mL
8	COD 30 000 mg/L	加水稀释 2 倍，每 4 d 浇灌一次，每次 380 mL

1.4　测定指标及方法

1.4.1　小白菜生长指标

试验结束后，测量不同处理组小白菜的株高、根长、叶宽、叶片数、地上部鲜重和地上部干重。其中用直尺测量其宽度、株高和根长；用电子天平称量植株地上部鲜重；将地上部分置于 105 ℃烘箱烘 3 h，再调整温度为 80 ℃烘至恒重并冷却称重，以获得地上部干重[16]。

1.4.2　小白菜光合指标

定植后 20 d 采收，每个处理组随机选取 3 株小白菜，选取生长最旺盛的叶片，取平均值，采用分光光度法通过紫外分光光度计（UV-1800，上海美普达仪器有限公司）测定其叶绿素含量。

1.4.3　小白菜品质指标

试验结束后，测定不同处理组小白菜的品质指标，包括可溶性糖和维生素 C 含量。可溶性糖含量采用蒽酮比色法[17]测定，维生素 C 含量采用 2，6-二氯酚靛酚滴定法[18]测定。

1.5　数据处理

采用 Office Excel 2016 软件处理试验数据，用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据分析和计算，不同处理间的差异显著性检验采用 SPSS 软件进行单因素方差分析（$P<0.05$ 表示差异显著），用 Origin 2021 软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同处理对小白菜生长指标的影响

株高是评价作物生长状况的基本指标之一[19]，不同 COD 质量浓度沼液喷施或浇灌下小白菜生长状况差异显著（表 3）。在等氮量情况下，高浓度沼液浇灌处理组（处理 5～8）效果优于低浓度沼液喷施组（处理 1～4）。随着沼液 COD 浓度的升高，低浓度沼液喷施组和高浓度沼液浇灌组的株高均呈先上升后下降趋势；在低浓度沼液喷施处理组中，处理 1 和 2、化肥喷施组（N）和空白喷施组（CK）差异不大，处理组 3 和 4 的小白菜平均株高分别为（23.33±0.72）cm 和（23.30±3.18）cm，相比于化肥喷施组分别提高了 35.09% 和 34.92%，说明施加微生物菌剂处理后的沼液，植株长势增强，增产潜力大。高浓度沼液浇灌处理组株高最大值出现在处理 7 中，其次为处理 8，说明适宜沼液浓度浇灌可以有效促进小白菜株高的增长，起到增产提质的作用。相比于低浓度沼液喷施株高最高的处理 3，处理 7 株高提高了 14.57%，表明在等量氮投加条件下，沼液浇灌方式相比于喷施方式对于小白菜的生长效果更好。

根部是作物从土壤吸收养分的主要器官。随着施用沼液处理组 COD 含量的提高，无论是低浓度喷施沼液处理组还是高浓度浇灌沼液处理组，作物根长均呈现先上升后下降的趋势，喷施沼液处理组中处理 3 的促进效果最为明显，根长为（8.57±1.36）cm（表 3）。浇灌沼液处理 6～8 效果均优于低浓度喷施处理 3，根长分别为（9.10±1.51）cm、（9.47±1.28）cm 和（9.37±1.86）cm，均高于化肥组（7.42±1.52）cm。可能因为沼液富含氮磷钾等营养元素，适量施加沼液可以提高土壤肥力，促进作物的生长发育，对作物的株高和根长有促进作用[20-22]，可以有效提高作物产量。

随着施用沼液COD质量浓度的提高，处理1～4叶宽呈现上升趋势，处理5～8的叶宽呈现先升高后下降的趋势，其中叶宽最大值出现在高浓度沼液浇灌处理7中，为(10.60±0.80)cm(表3)。叶片数在处理1～4和处理5～8都呈现先升高后下降的趋势，施用化肥处理组叶片数量要低于CK组，由此可见，施用化肥并不利于小白菜叶片的合成。处理7的叶片数最大，为(9.33±1.15)片，但是过高COD质量浓度的沼液(处理8)会对作物的生长起到一定的抑制作用。小白菜的地上部干重与叶宽变化趋势基本一致，而地上部鲜重呈现先上升后下降的趋势，低浓度沼液叶面喷施组与化肥组对小白菜的地上部鲜重/干重没有显著性影响，但是高浓度沼液浇灌对小白菜的地上部鲜重/干重有一定的促进作用，其中沼液浇灌处理7地上部鲜重最大，为(30.05±2.16)g/株，相比于化肥组提高了26.15%(表3)。

表3 不同处理对小白菜生长指标的影响

Table 3 Effects of different treatment groups on growth indices of Chinese cabbage

处理 Treatment	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	叶宽/cm Leaf width	叶片数/片 Number of blades	地上部干质量/(g/株) Dry weight of overground	地上部鲜质量/(g/株) Fresh weight of overground
CK	16.53±0.56 b	5.63±0.40 b	7.43±1.02 ab	7.00±1.00 ab	1.10±0.08 a	21.28±2.05 a
N	17.27±1.25 b	7.42±1.52 ab	8.17±0.86 ab	6.67±0.57 b	1.26±0.11 a	23.82±1.25 a
1	16.40±0.85 b	5.67±0.57 b	7.00±0.95 b	7.00±1.00 ab	1.14±0.06 a	21.77±0.45 a
2	17.57±0.55 b	7.00±0.86 ab	7.33±0.90 ab	8.00±1.00 ab	1.15±0.06 a	23.72±1.16 a
3	23.33±0.72 a	8.57±1.36 a	8.33±1.04 ab	8.33±0.57 a	1.15±0.06 a	23.56±1.99 a
4	23.30±3.18 a	8.13±2.35 ab	9.07±0.60 a	7.67±0.57 ab	1.28±0.05 a	23.67±1.08 a
5	24.77±0.64 a	7.27±0.25 ab	9.03±0.51 bc	8.00±0.00 ab	1.44±0.08 ab	23.26±2.16 c
6	24.87±1.51 a	9.10±1.51 a	9.10±0.10 bc	8.00±1.00 ab	1.64±0.22 a	26.91±2.16 ab
7	26.73±2.35 a	9.47±1.28 a	10.60±0.80 a	9.33±1.15 a	1.74±0.14 a	30.05±2.16 a
8	25.80±1.35 a	9.37±1.86 a	9.93±1.22 ab	9.00±1.00 a	1.67±0.20 a	28.23±1.73 a

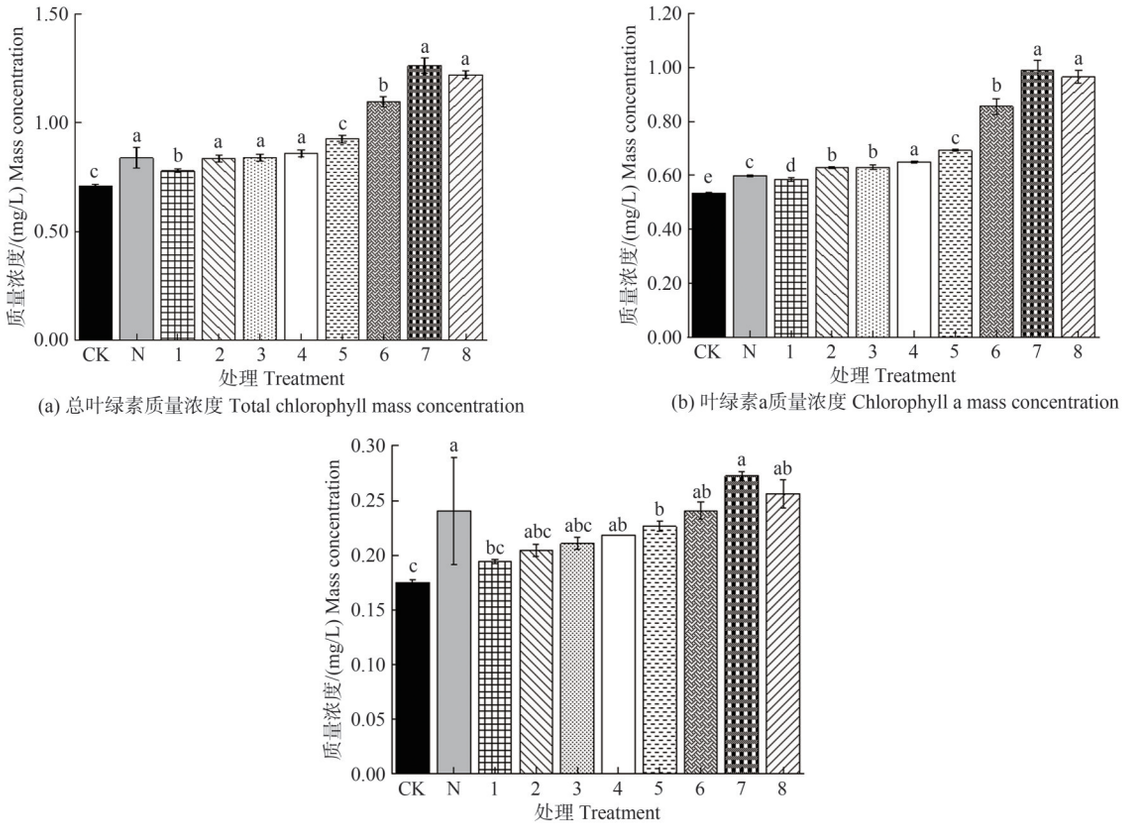
注：处理中字母和数字代表含义见表2。同列字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The meanings of letters and numbers in the processing are shown in Table 2. Different numbers and letters in the same column in the table indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

2.2 不同处理对小白菜光合指标的影响

叶绿素是参与植物光合作用的主要色素。如图1所示，化肥组和沼液喷施处理2～4总叶绿素质量浓度无显著性差异，约为0.84 mg/L，均高于空白组(CK)和较低浓度沼液喷施处理1；高浓度沼液浇灌处理组小白菜叶片叶绿素质量浓度随浇灌沼液COD质量浓度的增大呈现先增加后降低趋势，最大值为沼液浇灌处理7，叶绿素质量浓度为1.26 mg/L。由此可见，浇灌适宜浓度的沼液可以促进小白菜叶绿素的合成。

低浓度沼液喷施处理后的小白菜中所含的叶绿素a质量浓度由高到低顺序为处理4＞处理3＝处理2＞处理1；高浓度沼液浇灌处理后的小白菜叶绿素a质量浓度由高到低含量为处理7＞处理8＞处理6＞处理5，其中处理7叶绿素a质量浓度最高，为0.99 mg/L，相比于CK组和化肥组分别提高了86.79%和65.00%(图1)。叶绿素b质量浓度与叶绿素a质量浓度总体变化趋于一致，叶绿素b质量浓度最高值达到0.27 mg/L，同样发生在处理组7，相比于CK组和化肥组(N)分别提高了58.82%和12.50%，同时施用化肥组也高于CK组。由此可见，施用化肥和沼液在一定程度上对叶绿素的合成均能起到促进作用，浇灌沼液效果更佳。这可能是因为沼液中含有腐植酸和维生素C等物质，能促进根系发育、提高叶绿素含量，能够提高植物生长活性[23]。同时微生物菌剂内的微生物菌群可以活化土壤活性酶，分解有机物，提高叶绿素含量，以此增强光合作用[24]。施用经过微生物菌剂处理过的沼液能够有效提高作物的叶绿素含量，对作物的生长有促进改善作用[25-26]。



(a) 总叶绿素质量浓度 Total chlorophyll mass concentration

(b) 叶绿素a质量浓度 Chlorophyll a mass concentration

(c) 叶绿素b质量浓度 Chlorophyll b mass concentration

处理中字母和数字代表含义见表2。图中字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

The meanings of letters and numbers in the processing are shown in Table 2. Different letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

图1　不同处理对小白菜光合指标的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on photosynthetic of Chinese cabbage

2.3　不同处理对小白菜品质指标的影响

可溶性糖含量是植物体内碳素营养状况以及作物性状品质的主要参考指标[27]。由图2可知，随着喷施/浇灌沼液COD质量浓度的提高，小白菜中所含的可溶性糖含量也呈上升趋势。值得注意的是，所有沼液处理组的可溶性糖含量均高于CK组和化肥组，施用沼液可提高小白菜所含的可溶性糖含量。对于叶面喷施方式，处理2～4不存在显著性差异；处理4效果最优，可溶性糖含量为1.07%，相比于对照组和化肥组分别提高了38.96%和16.30%。沼液浇灌方式条件下，各处理组的可溶性糖含量由高到低排序为处理7>处理8>处理6>处理5，处理7的可溶性含量为1.33%，处理1～8的可溶性糖含量相较于CK组和化肥组分别提高了62.34%～72.73%和35.87%～44.57%。在相同施氮量情况下，处理7相较于处理4，沼液的COD质量浓度增加了10倍，可溶性糖含量提高了24.30%。由此可见，在实际的施肥过程中，合适的施肥方式更有利于发挥沼液的作用。

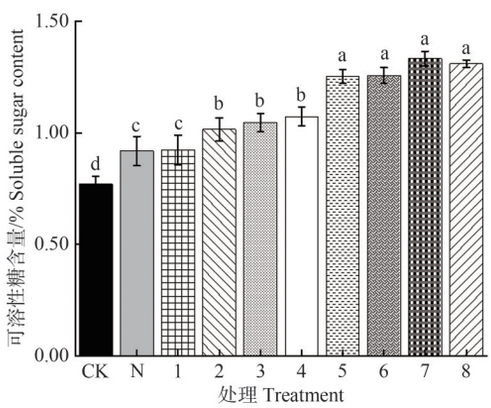


图2　不同处理组小白菜可溶性糖含量

Fig. 2　Soluble sugar content of Chinese cabbage for different treatments

维生素C含量是评价作物品质的重要营养指标之一。如图3所示，施加沼液处理组的维生素C质量浓度均高于CK组，浇灌沼液处理7和8的维生素C质量浓度最高，均为0.45 mg/L，比施用化肥处理

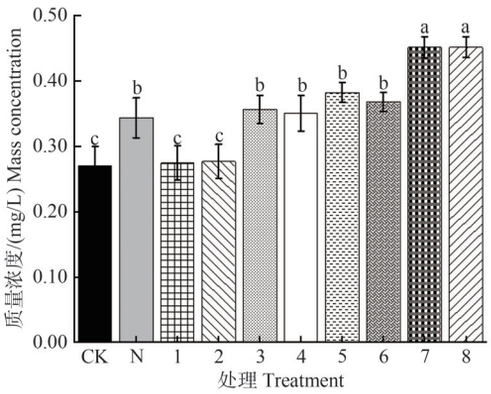


图3 不同处理组小白菜维生素C含量

Fig. 3 Vitamin C content of Chinese cabbage for different treatments

组提高了32.35%，相比于其他沼液施用组和化肥处理组具有显著性差异。由此可见，在小白菜种植过程中，施加较高COD质量浓度的沼液更有利于小白菜体内维生素C的合成。

3 讨论与结论

本研究将经稀释和微生物菌剂预处理后的沼液替代化肥用于盆栽小白菜，结果表明，叶面喷施低质量浓度沼液作为沼液利用的有效措施，可以起到及时补充和调节作物营养的作用，其中沼液稀释15～20倍效果最优；浇灌高质量浓度沼液能够明显提高小白菜的各项生长品质指标，效果优于仅施尿素的化肥处理组，最佳施用方案为稀释1.5倍。在相同氮素水平下，浇灌高质量浓度沼液效果优于叶面喷施低质量浓度沼液。高质量浓度沼液中的有机质含量更为丰富，且浇灌的施用方式更有利于作物根系对于营养元素的吸收。可以将浇灌高质量浓度沼液作为主要施肥方式代替传统化肥，叶面喷施低质量浓度沼液可作为补充施肥方式，补充作物养分。

利用微生物菌剂处理沼液可以提高高浓度沼液的净化效果，为沼液处理利用提供参考[14]。将微生物菌剂处理后的不同浓度沼液作为肥料，对小白菜的生长指标、光合指标和品质指标均具有明显的促进效果，能够增强盆栽小白菜的长势，使其根系发达、叶面积增大，对于农作物的生长具有促进作用。彭智平等[28]利用乳酸菌、酵母菌和放线菌等多种微生物菌种组成的复合微生物菌剂对猪场沼液进行处理，结果表明，通过微生物处理能显著提高透明度，各项指标基本达到排放与农灌标准，萝卜种子发芽率和发芽指数均有明显的提高，发芽率可从原沼液的55.00%提升至76.67%～93.33%，对于农作物的生长有一定的促进效果。同时，不同沼液浓度与施用方式对小白菜的生长发育情况影响不同。慕京生等[29]通过沼液浓缩液配制配方肥用于盆栽试验，结果表明浓缩沼液配方肥叶面喷施对于小白菜有显著的增产效果，对于提升小白菜的光合作用效率和品质指标效果显著，喷施沼液浓缩配方肥相比CK组（不施浓缩沼液配方肥）增幅13.60%。而本试验中喷施效果最好的处理4叶绿素含量相比于CK组提高了21.13%，说明施加沼液可以有效提高蔬菜作物的叶绿素含量，而叶绿素含量又是光合作用中最重要的因素，在一定程度上反映了作物光合能力的强弱[30]。另外，本试验对比了叶面喷施和浇灌方式对小白菜生长的影响，结果发现浇灌高COD质量浓度沼液对小白菜的生长更有效，这与林少华等[31]的研究结论一致。其研究结果指出，施加沼液对紫甘蓝的生长有促进作用，喷施组的产量低于浇灌组，表明浇灌更有利于蔬菜吸收养分，促进其生长，且随着施加沼液浓度的提高，促进作用越明显，沼液的最佳施用量存在一个较优范围。

在等氮条件下，沼液的COD质量浓度会影响施肥效果。王子臣等[32]研究表明，沼液COD对土壤环境因子和黄瓜幼苗生长有一定的影响，低量COD沼液（1 566 kg/hm^2）可促进幼苗生长，加快土壤有效磷的供应峰值，有非常明显的保水和保温效果，高量COD沼液（3 132 kg/hm^2）会抑制幼苗生长。这与本研究结果一致，在等氮条件下，喷施低浓度沼液和浇灌高浓度沼液都会对小白菜生长品质有一定的影响。沼液COD质量浓度如果过高，反而对小白菜的生长有抑制作用，这说明适宜COD质量浓度会对小白菜幼苗干物质及氮磷钾等微量元素的积累有促进作用[33]。因此，将微生物菌剂处理后的沼液应用于小白菜栽培，不仅可以提高其生长品质，还能够部分代替化肥施用，同时可以采用不同的沼液施用方式，实现沼液肥利用效率、作物产量与生

长品质的提高。此外，沼液自身存在较大异味，如何降低沼液异味，提高沼液利用效率，进而实现沼液资源效益最大化，促进沼液高值化利用和种养结合，是学者们今后的研究方向。

参考文献　References

[1] 汪筱琳，郭丹．我国农业废弃物资源化处理现状及问题分析[J]．河北农机，2021(9)：167-168
Wang X L, Guo D. Analysis on the present situation and problems of agricultural waste resource treatment in China[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2021(9): 167-168 (in Chinese)

[2] 赵佳颖，周晚来，戚智勇．农业废弃物基质化利用[J]．绿色科技，2019(22)：232-234，241
Zhao J Y, Zhou W L, Qi Z Y. Analysis on the utilization of agricultural wastes[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(22): 232-234, 241 (in Chinese)

[3] 刘艳丽，赵娜娜，范贝贝，李乃荟，董泰丽，陈清，慕康国．浓缩沼液中添加芽孢杆菌对促生和抑菌功能的强化效应[J]．中国农业大学学报，2023，28(7)：68-78
Liu Y L, Zhao N N, Fan B B, Li N H, Dong T L, Chen Q, Mu K G. Enhancement effect of *Bacillus* spp added to concentrated biogas slurry on the functions of growth promotion and bacterial inhibition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(7): 68-78 (in Chinese)

[4] Calbry-Muzyka A, Madi H, Rüsch-Pfund F, Gandiglio M, Biollaz S. Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste[J]. *Renewable Energy*, 2022, 181: 1000-1007

[5] Jeong K, Abbas A, Shin J, Son M, Kim Y M, Cho K H. Prediction of biogas production in anaerobic co-digestion of organic wastes using deep learning models[J]. *Water Research*, 2021, 205: 117697

[6] 董颐玮，梁栋，李丹阳，靳红梅．沼液主要养分含量特征分析[J]．江苏农业学报，2021，37(5)：1206-1214
Dong Y W, Liang D, Li D Y, Jin H M. Characteristic analysis of main nutrient content in biogas slurry[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(5): 1206-1214 (in Chinese)

[7] 牛希成，董泰丽，刘静．畜禽粪污沼液的综合利用及处理方式研究综述[J]．安徽农业科学，2016，44(29)：26-29
Niu X C, Dong T L, Liu J. Summary of the multipurpose use and dealing ways about poultry manure bio-slurry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(29): 26-29 (in Chinese)

[8] 杨雪妍，刘佳琪，李彦明，陈清．常瑞雪．不同厨余沼液及其稀释倍数对黄瓜和萝卜种子萌发的影响[J]．中国蔬菜，2022(12)：86-91
Yang X Y, Liu J Q, Li Y M, Chen Q, Chang R X. Effects of different kitchen waste biogas slurry and its dilution multiples on seed germination of cucumber and radish[J]. *China Vegetables*, 2022(12): 86-91 (in Chinese)

[9] 王树仁，孙波．不同浓度沼液对反季大叶芹产量和质量的影响[J]．可再生能源，2007，25(3)：90-91
Wang S R, Sun B. Experiment about various concentration methane pool liquid' effect on off season yamazer's quality and output[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(3): 90-91 (in Chinese)

[10] Wu J, Yang Q, Yang G, Shen F, Zhang X H, Zhang Y Z. Effects of biogas slurry on yield and quality of oil-seed rape[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(13): 2084-2098

[11] Xu Z M, Wang Z, Gao Q, Wang L L, Chen L, Li Q G, Jiang J J, Ye H J, Wang D S, Yang P. 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

[12] 文晓娥．我国微生物肥料的研发及其在农业生产中的应用[J]．新农业，2021(4)：92-93
Wen X E. Research and development of microbial fertilizer in China and its application in agricultural production[J]. *Modern Agriculture*, 2021(4): 92-93 (in Chinese)

[13] 秦立金，尹慧来，王塔娜，秦通欣，吴雨桐，韩奕，邵晓娟，吴宏飞，吕国帅．复合微生物菌剂与生物有机肥复配对甜瓜增产提质抗病的研究[J]．赤峰学院学报：自然科学版，2021，37(12)：40-44
Qin L J, Yin H L, Wang T N, Qin T X, Wu Y T, Han Y, Shao X J, Wu H F, Lv G S. Study on the combination of compound microbial inoculum and bio-organic fertilizer to increase yield, improve quality and disease resistance of melon[J]. *Journal of Chifeng University: Natural Science Edition*, 2021, 37(12): 40-44 (in Chinese)

[14] 娄雨，李艳，姜灵伟，李明新，王琦璋，马继涛，林聪，段娜．微生物菌剂处理不同浓度沼液效果[J]．食品与发酵工业，2023，49(9)：135-141
Lou Y, Li Y, Jiang L W, Li M X, Wang Q Z, Ma J T, Lin C, Duan N. Effects of different concentrations of biogas slurry and topdressing methods on the growth of Chinese Cabbage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 135-141 (in Chinese)

[15] 赵长盛，胡承孝，陈庆锋．不同氮处理对蔬菜产量和硝酸盐含量的影响[J]．长江蔬菜，2012(14)：71-77
Zhao C S, Hu C X, Chen Q F. Effects of different nitrogen treatments on vegetable yield and nitrate content[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2012(14): 71-77 (in Chinese)

[16] 张馨．基于光合模拟的水培生菜反馈环控技术基础[D]．北京：中国农业大学，2017
Zhang X. Technical foundation of environmental feedback control of hydroponic lettuce based on photosynthesis simulation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)

[17] 张述伟，宗营杰，方春燕，黄赛华，李静，许建华，王亦菲，刘成洪．蒽酮比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]．食品研究与开发，2020，41(7)：196-200
Zhang S W, Zong Y J, Fang C Y, Huang S H, Li J, Xu J H, Wang Y F, Liu C H. Optimization of anthrone colorimetric method for rapid determination of soluble sugar in barley leaves[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(7): 196-200 (in Chinese)

[18] 李泽鸿，管玉兵，练荣伟，张帆，张璐．三种方法测定苍耳VC含量的研究[J]．北方园艺，2011(1)：200-202
Li Z H, Guan Y B, Lian R W, Zhang F, Zhang L. Analysis on the content of VC in xanthium l by three methods[J]. *Northern Horticulture*, 2011(1): 200-202 (in Chinese)

[19] 柳静，毛文海，杨红，王昌梅，赵兴玲，尹芳，张无敌．小白菜种植施用沼肥试验初探[J]．南方农业，2021，15(21)：41-42
Liu J, Mao W H, Yang H, Wang C M, Zhao X L, Yin F, Zang W D. Efficacy of vegetable waste biogas slurry on yield, quality and nitrogen use efficiency of cauliflower[J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(21): 41-42 (in Chinese)

[20] Zhao Z C, Zhao S F, Fu L Y, Yao L, Wang Y Q. Efficacy of vegetable waste biogas slurry on yield, quality and nitrogen use efficiency of cauliflower[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 621(1): 012066

[21] Abbas A, Naveed M, Azeem M, Yaseen M, Ullah R, Alamri S, Farooq

Q U A, Siddiqui M H. Efficiency of wheat straw biochar in combination with compost and biogas slurry for enhancing nutritional status and productivity of soil and plant[J]. *Plants*, 2020,9(11): 1516

[22] Zhao Z C, Zhao S F, Wang Y Q, Fu L Y, Yao L. Effect of biogas slurry on water footprint in cauliflower production[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,2021,647(1):012111

[23] Ai P, Jin K, Alengebawy A, Elsayed M, Meng L, Chen M, Ran Y. Effect of application of different biogas fertilizer on eggplant production: Analysis of fertilizer value and risk assessment [J]. *Environmental Technology & Innovation*,2020,19:101019

[24] 朱丽,姬振蒙,殷敏,任荣荣,顾闽峰,晏军,费月跃. 不同微生物菌剂对羊角椒生长发育及病害的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(11): 2655-2661
Zhu L, Ji Z M, Yin M, Ren R R ,Gu M F, Yan J, Fei Y Y. Effects of different microbial agents on the growth, development and disease of zanthoxylum esculentum[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(11): 2655-2661 (in Chinese)

[25] 王礼伟,汪国莲,王宏宝,周刚,赵晨,王萍,蒋守华. 沼液代替化肥对甜瓜生长及土壤微生物的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(9):2498-2506
Wang L W, Wang G L, Wang H B, Zhou G, Zhao C, Wang P, Jiang S H. Effects of applying biogas slurry instead of chemical fertilizer on the growth of melon and soil microorganism [J]. *Journal of Southern Agriculture*,2021,52(9):2498-2506 (in Chinese)

[26] 张新建,赵秋,宁晓光. 施用沼液肥对盆栽黄瓜生长、产量及品质的影响[J]. 天津农业科学,2020,26(5):5-8
Zhang X J, Zhao Q, Ning X G. Effects of biogas slurry fertilizer application on growth, yield and quality of potted cucumber[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*,2020,26(5):5-8 (in Chinese)

[27] 姜灵伟,陈锐,冉毅,贺莉,梅自力,刘宏斌,林聪,段娜. 沼肥种类及不同施氮量对芹菜品质影响研究[J]. 中国沼气,2020,38(1):80-84
Jiang L W, Chen R, Ran Y, He L, Mei Z L, Liu H B, Lin C, Duan N. Effects of different digestate source and nitrogen application rate on the quality of celery[J]. *China Biogas*,2020,38(1):80-84 (in Chinese)

[28] 彭智平,李文英,杨少海,黄继川,于俊红,杨林香,林志军. 微生物菌剂处理猪场沼液效果研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 366-369
Peng Z P, Li W Y, Yang S H, Huang J C, Yu J H, Yang L X, Lin Z J. Study on treatment of piggery biogas slurry with microorganism preparation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (1): 366-369 (in Chinese)

[29] 慕京生,王静,杨琼. 沼液浓缩配方肥在小白菜生产中的应用研究[J]. 南方农业,2019,13(2):1-3
Mu J S, Wang J, Yang Q. Study on application of biogas slurry concentrated formula fertilizer in Chinese cabbage production[J]. *South China Agriculture*,2019,13(2):1-3 (in Chinese)

[30] 李昕颖,赵庆霞,张成富,蔡银美,何腾兵. 沼液氮肥对白菜型油菜叶片光合特性与叶绿素荧光特性的影响[J]. 分子植物育种,2022,20(10):3381-3385
Li X Y, Zhao Q X, Zhang C F, Cai Y M, He T B. Effects of biogas slurry on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics of rapeseed leaves[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(10):3381-3385 (in Chinese)

[31] 林少华,凌玮,孙芹菊,韩建刚,李萍萍. 滨海盐碱地施用沼液对紫甘蓝生长及土壤性状的影响[J]. 中国沼气,2019,37(1):80-87
Lin S H, Ling W, Sun Q J, Han J G, Li P P. Effects of biogas slurry application on purple cabbage growth and the soil properties in coast saline-alkali land[J]. *China Biogas*,2019,37(1):80-87 (in Chinese)

[32] 王子臣,王鑫,张岳芳,郭智,盛婧,郑建初. 沼液COD对黄瓜幼苗生长及土壤环境因子的影响[J]. 中国农学通报,2019,35(4):15-22
Wang Z C, Wang X, Zhang Y F, Guo Z, Sheng J, Zheng J C. COD in biogas slurry: Effects on cucumber seedling growth and soil environmental factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(4):15-22 (in Chinese)

[33] 祁步凡. 猪场沼液膜浓缩制肥及其对小白菜的肥效与安全性评价[D]. 成都:成都大学,2020
Qi B F. Study on fertilizer efficiency and safety of pig farm liquid digestate membrane concentrate based fertilizer on pakchoi (*Brassica chinensis* L)[D]. Chengdu: Chengdu University,2020 (in Chinese)

责任编辑: 董金波

第一作者简介: 娄雨,中国农业大学水利与土木工程学院农业生物环境与能源工程系硕士研究生。研究方向为农业农村废弃物资源化利用。曾获中国农业大学硕士一等学业奖学金、中国农业大学校级“优秀三好学生”、中国农业大学硕士二等学业奖学金等荣誉。在《食品与发酵工业》期刊以第一作者身份发表论文1篇。

通讯作者简介: 段娜,中国农业大学水利与土木工程学院教授级高级工程师、博士生导师。兼任农业农村部沼气产品及设备质量监督检验测试中心华北工作站副站长、中国农业大学(三河)教授工作站站长、亚行农业绿色产业和废污管理项目可再生能源专家、《中国沼气》和*Agriculture*编委。主要从事生物质厌氧/好氧生物转化技术与强化策略、奶牛卧床垫料技术与装备、沼渣沼液安全高值化利用技术与产品等研究。主持“十三五”“十四五”国家重点研发计划课题、国家自然科学基金等多项国家级、省部级课题,授权专利13项,转化专利2项;主持行业标准1项,发布行业标准7项;发表论文70余篇,包括ESI高被引论文1篇;获得省部级奖励1项,社会力量一等奖2项,校教学成果一等奖3项。