

梁飞虹, 崔秋芳, 涂 特, 等. 基于水培技术的沼液净化及生菜品质提升[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 788–795.

LIANG Fei-hong, CUI Qiu-fang, TU Te, YU Ge, et al. Benign treatment of biogas slurry and improvement in lettuce quality using hydroponics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 788–795.

## 基于水培技术的沼液净化及生菜品质提升

梁飞虹, 崔秋芳, 涂 特, 余 歌, 王文超, 晏水平\*

(华中农业大学工学院/农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要:**以沼液处理后用作农田灌溉用水及低成本生产高品质生菜为目标, 采用水培生菜对沼液进行深度净化处理, 并以水培前后沼液主要水质参数及生菜品质特性为指标, 研究了水培生菜对沼液的净化性能和沼液水培对生菜品质的提升效果, 并筛选出了合适的沼液稀释倍数。研究中, 先对沼液进行脱氨预处理, 然后进行 5~30 倍稀释后用于水培生菜, 并与化学营养液水培效果进行对比。结果表明, 采用脱氨沼液水培生菜处理 35 d 后, 氨氮、COD 和总磷含量分别下降 98.25%~99.34%、83.68%~96.04% 和 65.94%~80.00%, 脱氨沼液的水质指标优于农田灌溉用水标准, 且稀释 5~15 倍的脱氨沼液水培后可在沼液净化效果和节约用水等方面获得综合最优。另外, 脱氨沼液可替代营养液用于水培生菜, 且生菜的品质更佳, 尤其是 5~10 倍稀释处理。此时, 与营养液水培相比, 其生菜相对生长量提高 60% 以上, 叶幅变宽 4~5 cm, 叶片数平均增加 2 片; 类胡萝卜素含量最高提高 20.40%, 硝态氮含量仅为化学营养液组的 2.11%~4.02%, 差异显著; 还原糖含量提高约 7.79%~10.39%, 而维生素 C 含量仅低 3.60%~15.40%, 差异并不明显。研究表明, 沼液脱氨并适当稀释后可以代替化学营养液用于水培生菜, 且水培处理后的沼液可以用于灌溉农田。

**关键词:**沼液; 沼液处理; 生菜水培; 氨氮脱除

**中图分类号:** S216.4   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-2043(2018)04-0788-08   **doi:** 10.11654/jaes.2017-1261

### Benign treatment of biogas slurry and improvement in lettuce quality using hydroponics

LIANG Fei-hong, CUI Qiu-fang, TU Te, YU Ge, WANG Wen-chao, YAN Shui-ping\*

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Determining the most effective and low-cost method for treating biogas slurry is one of the biggest issues for large-scale biogas projects. This study aimed to treat biogas slurry for farmland irrigation water and cultivate lettuce of high quality at low cost using hydroponic technology to reduce the concentration of pollutants, including total ammonium nitrogen (TAN), chemical oxygen demand (COD), and total phosphorus (TP). Effects of the dilution ratio of water on the removal of pollutants and lettuce quality were investigated, and the appropriate dilution ratios for biogas slurry were calculated. Prior to the experiments, ammonium nitrogen was partly removed from the raw biogas slurry using vacuum distillation. The part-treated biogas slurry was then CO<sub>2</sub> saturated to reduce the pH to about 6.7. Finally, CO<sub>2</sub>-rich biogas slurry was diluted using water by 5~30 times as the hydroponic solution for cultivation. Lettuce cultivated in the typical chemical nutrient solution was used as the control. Results showed that after 35 d the water quality of the treated biogas slurry fully met the requirements of farmland irrigation standards, and the concentrations of TAN, COD, and TP were reduced by 98.25%~99.34%, 83.68%~96.04%, and 65.94%~80.00%, respectively. In addition, 5~15 dilution ratios are recommended for higher purification of pollutants and water savings for biogas slurry. After TAN removal, the treated slurry was used to replace the chemical nutrient solution to cultivate lettuce of higher quality.

收稿日期: 2017-09-15   录用日期: 2017-11-27

作者简介: 梁飞虹(1993—), 男, 陕西富平人, 硕士研究生, 主要从事农业废弃物综合利用研究。E-mail: lianf2008@outlook.com

\* 通信作者: 晏水平   E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51376078); 公益性行业(农业)科研专项(201303099); 中央高校基本科研业务费专项基金(2015PY077)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (51376078); The Special Scientific Research Fund of Agriculture Public Welfare Profession of China (201303099); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015PY077)

Compared to the nutrient solution, the relative growth of lettuce cultivated in biogas slurry with 5~10 dilution ratios increased by more than 60%, the leaf width increased by 4~5 cm, and the average number of leaves increased by about 2. Furthermore, the difference in the carotenoid and nitrate nitrogen concentrations between lettuce cultivated in biogas slurry and the chemical nutrient solution was significant. However, the differences in the reducing sugar and vitamin C content were not significant. More specifically, when cultivated in biogas slurry with 5~10 dilution ratios, the carotenoid content in lettuce increased by up to 20.40%, and the concentration of nitrate nitrogen was only 2.11%~4.02% that of lettuce cultivated in the chemical nutrient solution. In addition, the reducing sugar content increased by 7.79%~10.39%, and the vitamin C content only decreased by 3.60%~15.40%.

**Keywords:** biogas slurry; slurry treatment; lettuce hydroponics; ammonium nitrogen removal

沼液中含有高含量的矿质元素,如果处置不当,极易造成环境的二次污染<sup>[1]</sup>。因此,沼液的低成本无害化处理已成为沼气工程良性发展的关键问题之一<sup>[2]</sup>。同时,由于沼液富含植物生长所需的微量元素和植物生长激素<sup>[3]</sup>,将其还田处理用作植物的根肥,既可实现营养元素的循环利用,增加农作物的产量,还可生产出无公害农产品,具有良好的社会和经济效益<sup>[4]</sup>。如以沼液代替高昂的无机营养液来进行蔬菜栽培,对提高蔬菜产量和品质具有重要意义<sup>[5]</sup>。同时,由于水培经济作物对污水中氨氮、磷和 COD(化学需氧量)等具有良好的去除效果<sup>[6]</sup>,对沼液进行蔬菜水培处理,理论上还能实现沼液的深度净化,一举多得。但值得注意的是,以沼液作为营养液时,其氨氮和磷含量等均有一定的限制,如生菜水培时,生菜生长中氨氮含量一般不宜超过 20 mg·L<sup>-1</sup>,磷含量不超过 30 mg·L<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>。显然,沼液自身氨氮和磷含量远超过这一指标,而高浓度的氨氮会对植物生长造成严重的毒害作用,会使植物的生长发育严重受阻<sup>[7]</sup>。基于此,目前沼液水培利用前一般都需要进行高倍稀释,从而降低沼液中的氨氮含量,这种方法操作简单,但却存在水资源浪费的潜在问题,同时,高倍稀释还可能导致沼液中促进植物生长的有益成分含量下降,影响其水培应用效果<sup>[8]</sup>。因此,在沼液水培利用前将氨氮进行预先脱除,可在保证沼液自身较低的植物生理毒害特性的基础上将沼液氨氮含量降至合适的水平<sup>[9-11]</sup>,有助于在水培应用中大幅降低沼液的稀释倍率。将脱氨预处理的沼液用于蔬菜水培时,理论上还可实现沼液的低成本高效净化处理。基于此,本研究对沼液进行脱氨预处理后,将

其用于水培生菜,重点分析生菜水培处理对沼液的净化及生菜产量与品质提升的效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用沼液来源于华中农业大学沼气发酵中试装置,发酵中以猪粪为主要原料,配合添加少量的牛粪及生活污水,在 35℃下中温发酵 20 d。沼液取回后在常温(25±5)℃下密封保存至不再产气后,将沼液在 4000 r·min<sup>-1</sup>下离心分离 20 min(TSZ5-WS 型低速多管架自动平衡离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司),取上清液进行试验。离心后,沼液的主要水质参数如表 1 所示。

供试植物选取广泛应用于无土栽培行业的生菜,本研究所选择的生菜种子为意大利生菜种子(广西横县子龙种业有限公司,纯度≥95%,发芽率≥80%,净度≥98%),用清水育苗培养至三叶龄后用于水培试验。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 沼液氨氮脱除

沼液氨氮脱除前,先在沼液中添加 10 g·L<sup>-1</sup>的 CaO,调整 pH 值至 12,然后于 75℃、40 kPa 条件下在沼液减压脱氨处理系统对沼液进行减压脱氨处理 1 h,减压脱氨处理系统及操作流程详见文献[12]。氨氮脱除后沼液的主要水质参数如表 1 所示。从表 1 中可知,在沼液脱氨过程中,COD 和总磷质量浓度分别下降了约 40.13%和 82.49%,其主要原因在于 CaO 的加入使沼液 pH 值上升,导致磷被 Ca<sup>2+</sup>沉淀<sup>[10]</sup>,同时

表 1 脱氨预处理前后离心沼液上清液的主要水质参数

Table 1 Water quality of the supernatant of biogas slurry before and after ammonium nitrogen removal

项目	氨氮质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>	化学需氧量/mg·L <sup>-1</sup>	pH 值	总磷质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>	电导率/mS·cm <sup>-1</sup>	硝态氮质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>
脱氨前	1168±8.49	3 163.45±5.25	7.6±0.07	221.24±0.33	15.36±0.33	3.58±0.06
脱氨后	91±1.41	1 893.8±30.97	11.8±0.14	38.75±1.18	5.58±0.29	—

CaO 本身具有絮凝作用,沼液中的悬浮颗粒被絮凝沉淀而脱除<sup>[13]</sup>,因此沼液 COD 下降。

### 1.2.2 脱氨沼液的 pH 值稳定

脱氨处理后的沼液采用 CO<sub>2</sub> 吸收的方式来调节 pH 值至近中性。首先将脱氨后的沼液温度降低至室温后,置于经典鼓泡反应器中并通入纯 CO<sub>2</sub> 气体,不断搅拌,使 CO<sub>2</sub> 与脱氨沼液充分接触并反应<sup>[12]</sup>,同时测试脱氨沼液的 pH 值,当 pH 值降到约 6.7 时,停止 CO<sub>2</sub> 吸收(约吸收 30 min)。此时,沼液即可用于生菜水培。

### 1.2.3 沼液水培生菜

以 pH 值稳定后的脱氨处理沼液为水培溶液,在瑞华 HP400GS-C 型智能人工气候箱中进行生菜的水培试验,气候条件模拟适宜生菜生长的最佳条件(首先在 16.5 °C、湿度 60% 条件下黑暗处理 12 h,再在光照 20 000 lx、温度 18 °C 和湿度 60% 条件下处理 9 h,然后在光照 12 000 lx、温度 18 °C 及湿度 65% 条件下处理 3 h,循环此设定)<sup>[14]</sup>,并以生菜的农艺学性状(根长、株高、生长量、叶幅、叶片数)、生理学性状(维生素 C 含量、叶绿素含量、还原糖含量、硝态氮含量和根系活力)和脱氨沼液培养前后的水质参数等为指标<sup>[15]</sup>,对水培后沼液的污染物脱除性能及生菜的品质进行研究。

试验中,以脱氨沼液的氨氮含量作为稀释指标,以 20 mg·L<sup>-1</sup> 的氨氮界值为基准<sup>[6]</sup>,将脱氨沼液分别稀释 5、10、15、20、25、30 倍作为处理组,并以化学营养液(由北京绿东国创农业科技有限公司生产的叶菜类专用肥配制而成)和自来水作为对照组,每 3 株生菜供应培养液 2 L,每隔 5 d 补充相应培养液至 2 L。研究中,从生菜三叶龄开始,35 d 后进行各项指标测定<sup>[15]</sup>。

## 1.3 测试方法

### 1.3.1 沼液水质参数测定

沼液的 pH 值采用 FE20 型 pH 计(梅特勒-托利多国际股份有限公司)测试,电导率(EC)采用 DDS-307A 型电导率仪测试(上海仪电科学仪器股份有限公司),氨氮、总磷(TP)含量以及 COD 通过 Smart-Chem200 全自动化学分析仪(意大利 AMS-Westco 公司)测试。测量时随机取样分析。

### 1.3.2 生菜农艺学性状测定

生长量采用精度为 0.01 g 的电子天平测量,称量前用自来水冲洗根系上的杂物,吸干水分后,进行称量。由于供试生菜的初始生物量相差较大,为消除处

理前的个体差异,更好地反映植物生长趋势,引入相对生长量,可采用下式进行计算<sup>[16]</sup>:

$$RG = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:RG 为相对生长量;W<sub>0</sub> 为处理前生物量,g·株<sup>-1</sup>;W<sub>i</sub> 为处理后生物量,g·株<sup>-1</sup>。

生菜处于自然伸展状态时,采用毫米刻度尺测量其根长、株高及叶幅<sup>[17]</sup>。

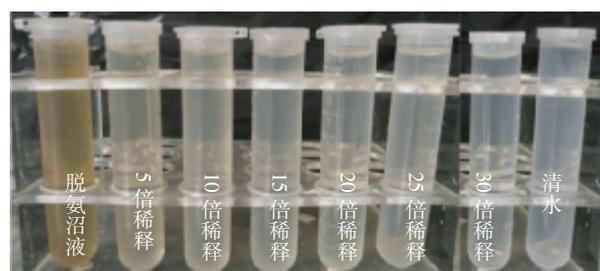
### 1.3.3 生菜生理学性状测定

生菜的还原糖含量和硝态氮含量分别采用 3,5-二硝基水杨酸法与硝基水杨酸法测定,根系活力采用 TTC 法测定,叶绿素(含叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)与维生素 C 含量分别采用 95% 乙醇法和滴定法进行测定<sup>[17]</sup>。

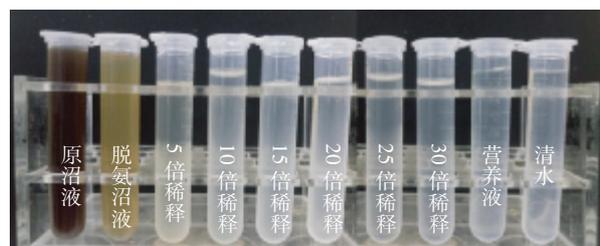
## 2 结果与讨论

### 2.1 生菜水培对沼液污染物脱除效果的影响

不同稀释倍数的脱氨沼液用于生菜水培 35 d 后,其表观浊度如图 1 所示。经过生菜水培处理后,脱氨沼液的颜色变得清澈,表明沼液浊度大幅下降,这可能是由于在水培过程中,生菜根系分泌出的根际物质促进了脱氨沼液中胶体的聚沉和色素的降解<sup>[18]</sup>。值得注意的是,当脱氨沼液稀释 10 倍以上用于生菜水培时,35 d 后培养废液的颜色接近于清水。



a. 水培前



b. 水培后

图 1 生菜水培前后不同稀释倍数沼液的浊度表现图

Figure 1 Turbidity diagram of biogas slurries with different dilution ratios before and after lettuce hydroponics

不同稀释倍数的脱氨沼液水培后的主要水质参数如表 2 所示。从表 2 可看出,脱氨沼液用于水培生菜后,沼液的 COD 和氨氮、TP 含量大幅下降,其中,氨氮脱除率可达 98.25%~99.34%、COD 脱除率为 83.68%~96.04%、TP 脱除率为 65.94%~80.00%,这可能是由于生菜吸收了脱氨沼液中的营养物质,而氮、磷等元素属于生菜生长所必需的大量元素,因此水培生菜后沼液中氮、磷等物质含量大幅下降。值得注意的是,氨氮和 TP 的脱除率随着稀释倍数的增大而升高,且在 30 倍稀释情形下达到最大值,但 COD 脱除率随着稀释倍数的增加而降低。另外,从 20 倍稀释沼液开始,随着稀释倍数的增加,水培生菜后的沼液中 COD 和氨氮、TP 含量的变化并不明显。因此,如从沼液中污染物脱除性能角度出发,可将脱氨沼液稀释 15~20 倍后进行水培生菜。如从节约稀释用水角度来综合考虑,建议沼液稀释 5~15 倍。

从农田灌溉用水角度考虑,用水的 COD、总氮和总磷质量浓度应分别低于 300、30 mg·L<sup>-1</sup> 和 10 mg·L<sup>-1</sup>,全盐量应低于 1000 mg·L<sup>-1</sup>(即 EC 值不超过 1333 μS·cm<sup>-1</sup>),且 pH 值不高于 8.5<sup>[9]</sup>。从表 1 可知,原沼液本身硝态氮含量仅为 3.58 mg·L<sup>-1</sup>,因此,水培后,水培废液中的总氮含量远低于农田灌溉用水的总氮标准(表 2)。同时,从表 2 还可知,不论何种稀释倍数,脱氨沼液用于生菜水培处理后,相关水质指标均优于农业灌溉用水标准。由于沼液中的重金属含量比较低<sup>[20]</sup>,因此,生菜水培能够有效净化脱氨沼液,且培养后的废液可以直接排放到农田中。

因此,从净化后沼液的表现浊度、污染物脱除效果、稀释用水量及培养后沼液是否可用于农田灌溉用

水等综合考虑,稀释 5~15 倍是值得考虑的脱氨沼液稀释倍数。

## 2.2 沼液水培对生菜品质的影响

一般而言,蔬菜的品质分为外观品质、营养品质和卫生品质,其中营养品质可采用维生素 C、还原糖、叶绿素含量等来反映,卫生品质主要包括农药残留、污染物残留以及硝态氮含量等<sup>[3]</sup>。由于水培中未添加任何的农药,因而在此仅采用硝态氮含量来说明生菜的卫生品质。

### 2.2.1 生菜的外观表现及相对生长量分析

不同稀释倍数的脱氨沼液水培生菜 35 d 后,生菜的外观表现型如图 2 所示。水培中,生菜的生长分为地上部和地下部两部分,当水培液中营养不足时,生菜将会优先满足地下部的生长,以使根系更发达而获得更多的营养。从图 2 可知,5~15 倍稀释的脱氨沼液水培时,生菜地上部的外观表现与营养液基本一致,其根系长度与营养液水培之间的差异并不显著,但根系更短(图 3a),说明 5~15 倍稀释时,脱氨沼液富含的粗纤维、氮、磷、钾、微量元素等生菜生长所需的营养物质浓度可有效满足生菜的营养需求<sup>[21]</sup>,因而水培中生菜的地上部将会优先生长。同时,由于沼液中还含有氨基酸、活性酶、植物生长激素等物质<sup>[22]</sup>,可促进生菜的生长发育,并提高生菜的光合能力<sup>[23]</sup>。因此,与营养液水培情形相比,5~15 倍稀释沼液水培时,生菜的地上部更发达,外观品质更佳,整体表现为叶片数增加(图 3b)、叶幅变宽(图 3c)。整体而言,稀释沼液水培生菜的叶片数和叶幅指标与营养液组差异并不显著,仅 10 倍稀释沼液水培的生菜在叶片数上与营养液组相比差异显著(图 3b)。随着沼液稀释

表 2 生菜水培前后沼液的水质指标变化

Table 2 Water quality of biogas slurries with different dilution ratios before and after lettuce hydroponics

水质指标	水培时间/d	营养液	脱氨沼液稀释倍数					
			5 倍	10 倍	15 倍	20 倍	25 倍	30 倍
pH 值	0	6.11±0.06	6.76±0.03	6.69±0.08	6.81±0.01	6.80±0.04	6.90±0.03	7.03±0.02
	35	6.78±0.02	8.50±0.07	8.36±0.03	8.45±0.11	8.34±0.03	8.54±0.24	8.38±0.13
COD/mg·L <sup>-1</sup>	0	17.00±1.41	378.82±2.70	189.41±4.00	126.26±2.64	94.70±5.44	75.76±2.99	63.13±2.74
	35	2.00±0.49	15.00±0.21	20.7±0.50	11.6±0.42	14.7±0.49	12.3±0.50	10.3±0.49
EC/μS·cm <sup>-1</sup>	0	1830±49.00	3417±59.00	1984±11.31	1549±20.51	1099±40.31	853±4.95	502±1.41
	35	501±1.00	498±1.41	370±3.54	311±2.12	234±7.78	251±1.41	122±7.78
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0	—	7.75±0.18	3.90±0.21	2.58±0.08	1.90±0.14	1.55±0.11	1.29±0.21
	35	—	2.64±0.10	0.87±0.02	0.59±0.04	0.43±0.04	0.31±0.06	0.29±0.03
氨氮/mg·L <sup>-1</sup>	0	9.06±0.04	18.5±0.35	9.4±0.42	6.3±0.21	4.7±0.49	3.7±0.21	3.03±0.23
	35	0.76±0.090	0.24±0.020	0.13±0.010	0.11±0.007	0.05±0.004	0.04±0.006	0.02±0.001

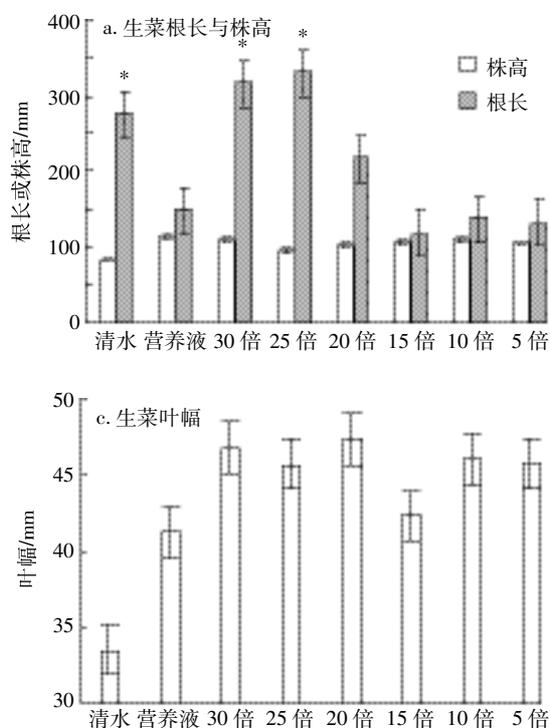
倍数的增加,沼液中富含的营养元素含量过低,已无法满足生菜的正常生长,进而使生菜发生畸形生长,失去了生产优势生菜的价值,如图2所示,具体表现为根长大幅增加、株高变矮(图3a),其中根长与营养液组之间的差异显著。

从生菜相对生长量角度来看,与营养液水培情形相比,脱氨沼液水培的生菜相对生长量更高,尤其是5~10倍稀释时,生菜相对生长量增加超过60%,两者与营养液组之间的差异显著(图3d)。其原因可能在于两者之间根系吸收与物质同化能力不同。图4反映



图2 脱氨沼液栽培35 d后的生菜表现型

Figure 2 Phenotype of lettuce cultivated by biogas slurry with different dilution ratios for 35 days



\*:以营养液为参比, $\alpha=0.1$ 。下同

\*: Compared with the chemical nutrient solution,  $\alpha=0.1$ . The same below

图3 不同水培液培养后的生菜农艺学特征

Figure 3 Agronomic characteristics of lettuce cultivated in different hydroponic solutions

了不同水培液培养后生菜的根系活力。根系活力是以脱氢酶活性(以四氮唑还原强度表示)为指标,酶活性的高低与底物浓度相关。如图4所示,与化学营养液水培相比,稀释5倍和10倍的脱氨沼液水培的生菜根系活力略有降低,但差异并不显著,这说明此时沼液中的营养元素与矿物质浓度较高,能完全满足生菜根系吸收及自身需求<sup>[6,24]</sup>,因而脱氢酶促反应可达到过饱和状态(处于0级反应阶段),故其根系活力只

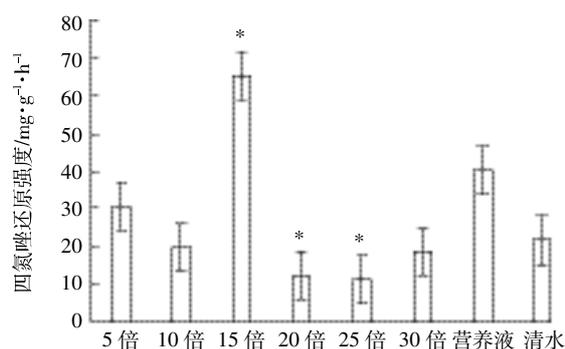


图4 不同水培液培养后生菜的根系活力

Figure 4 Root activity of lettuce cultivated in different hydroponic solutions

需发挥到适量时,生菜即能正常生长。当脱氮沼液稀释 15 倍时,生菜的根系活力大幅提升至最大值,与营养液组相比差异显著,说明此时测试沼液中的营养元素与矿物质含量可能刚好满足生菜的生长,因而脱氮酶促反应处于 1 级反应阶段,酶活性最高,故根系活力较高。但随着沼液稀释倍数的继续增加,营养元素与矿物质含量继续下降,根系无法吸收到充分的营养,脱氮酶没有足够的反应底物,酶促反应基本停滞,因此根系活力大幅降低,甚至低于清水水培的生菜根系活力。因此,基于有效营养元素与矿物质含量大小,5~10 倍稀释脱氮沼液水培生菜更有利于生菜的营养吸收,因而生菜相对生长量更高。

另外,从物质同化能力的角度来考虑,生菜合成的叶绿素含量越高,光合效率越强,物质同化能力也越强,因而水培中生菜合成和储存的有机物更多,相对生长量更高。显然,从图 5 可知,由于沼液中含有各种激素和氨基酸等,生菜有充分的营养物质积累去合成叶绿素,维持自身光合作用<sup>[25]</sup>,因此沼液水培的生菜叶绿素含量均高于营养液组(除 15 倍稀释外),但与营养液组相比差异并不显著,而氨氮水平略高于营养液的 5 倍稀释沼液水培的生菜,其叶绿素含量与营养液组相比显著升高,但氨氮水平与营养液一致的 10 倍稀释沼液水培的生菜与营养液组无明显差异。因此,氨氮丰富的沼液更适宜生菜进行物质同化,进而提升相对生长量。

综合考虑根系营养吸收及光合作用、叶片吸收等类型的同化能力,5~10 倍稀释的脱氮沼液可能更适用于水培生菜,能获得比化学营养液更高的生菜相对生长量与外观品质。

### 2.2.2 水培生菜的品质分析

如图 5 所示,由于脱氮沼液水培的生菜叶片中叶

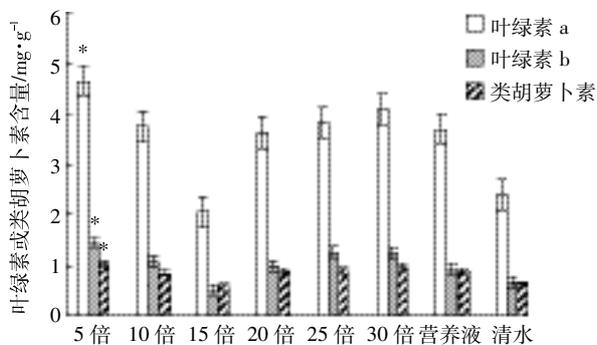


图 5 不同水培液培养后生菜的叶绿素与类胡萝卜素含量

Figure 5 Content of chlorophyll and carotenoid in lettuce cultivated in different hydroponic solutions

绿素合成加快,叶绿素含量提高,因此叶片中的类胡萝卜素含量略高于营养液组(15 倍稀释除外),尤其是 5 倍稀释组,其生菜叶片中的类胡萝卜素含量比营养液组增加约 20.40%,与营养液组差异显著。同时,由于脱氮沼液水培生菜的光合作用增强,生菜还原糖含量整体高于营养液组(除 15 倍和 20 倍稀释外),但差异并不显著,具体表现在 5、10、25 倍和 30 倍稀释组的生菜还原糖含量比营养液组略微增加(图 6a)。另外,如图 6b 所示,从生菜叶片维生素 C 含量来看,营养液水培生菜的营养品质略优于沼液水培,但值得注意的是,5~10 倍稀释的脱氮沼液水培生菜维生素 C 含量比营养液组略低,但差异并不显著。

因此,从水培生菜的营养品质角度来看,与营养液水培相比,15~20 倍稀释的脱氮沼液可能并不适合水培生菜。

由于生菜中含有的硝态氮会在其食用阶段转变为硝酸盐,含量高时会严重威胁人体健康<sup>[26-27]</sup>,本研究中主要采用生菜中硝态氮含量来反应生菜的卫生品质。不同水培液培养后生菜硝态氮含量如图 7 所示。与营养液水培相比,沼液水培的生菜硝态氮含量大幅下降,尤其是 5~10 倍稀释沼液,其培养的生菜硝态氮含量仅为化学营养液组的 2.11%~4.02%,与营养

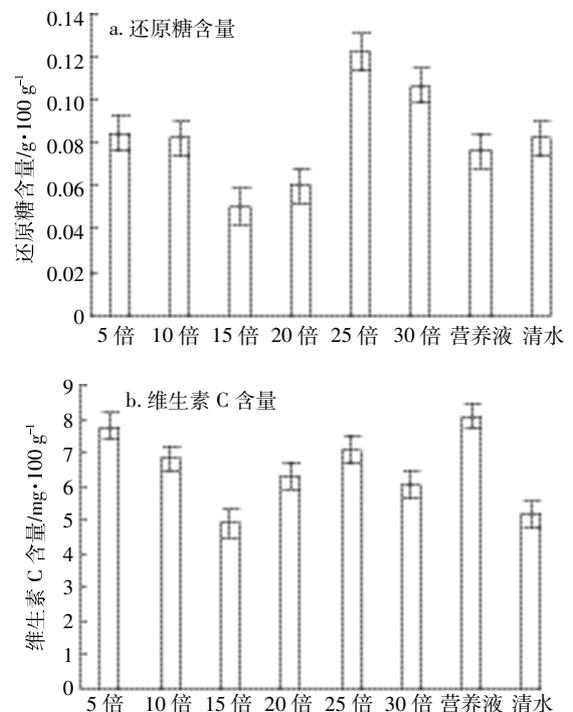


图 6 不同水培液培养后生菜的还原糖和维生素 C 含量

Figure 6 Content of reducing sugar and vitamin C in lettuce cultivated in different hydroponic solutions

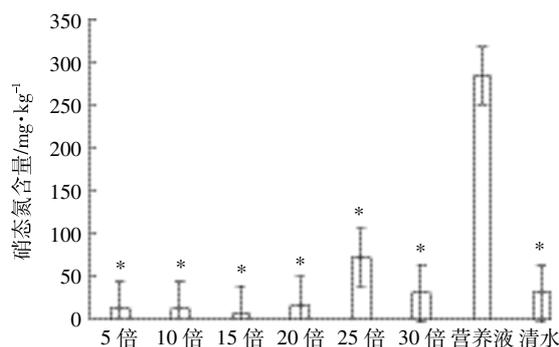


图7 不同水培液培养后生菜的确态氮含量

Figure 7 Nitrate nitrogen concentration in lettuce cultivated in different hydroponic solutions

液组相比差异显著,其原因可能是沼液中含有的多种植物激素及高含量有机质能增强蔬菜的光合作用<sup>[28]</sup>,且其中含有的氨基酸可能会对植物中的硝酸还原酶有激活作用<sup>[29]</sup>,二者能加速叶菜叶片中硝态氮的转化。因此,从生菜卫生品质角度考虑,5~15倍稀释后的脱氨沼液可能更适合于生菜水培。

综合考虑生菜的外观品质、相对生长量、营养及卫生品质,5~10倍稀释可能为最佳的脱氨沼液水培生菜稀释比例。同时,从氨氮含量角度来看,5~10倍稀释的沼液氨氮含量基本与营养液处于同一水平,但却表现出了更佳的水培效果。因此,5~10倍稀释的脱氨沼液比氨氮水平相当的营养液更适合水培生菜,这可能由于脱氨沼液比营养液含有更丰富的营养物质,且在低倍稀释区间并没有过分降低沼液中微量营养成分的含量,这也说明脱氨预处理沼液可能比沼液高倍稀释后直接利用更具优势。

### 3 结论

(1)脱氨沼液用于水培生菜后,沼液氨氮脱除率可达98.25%~99.34%、COD脱除率为83.68%~96.04%、TP脱除率为65.94%~80.00%,水培废液几乎接近清澈,且完全满足农业灌溉用水标准。从净化后沼液的表现浊度、污染物脱除效果、稀释用水量及培养后沼液是否可用于农田灌溉用水等综合考虑,稀释5~15倍是值得考虑的脱氨沼液稀释倍数。

(2)与营养液相比,5~10倍稀释的脱氨沼液水培的生菜更有利于生菜的营养吸收和物质同化,主要表现在相对生长量明显增加(可增加60%以上),叶幅变宽4~5 cm,叶片数平均增加了2片。

(3)脱氨沼液水培的生菜营养品质优于营养液水培,其中类胡萝卜素与还原糖含量普遍提高,而维生

素C含量略低,但差异并不明显。同时,沼液水培生菜的卫生品质大幅提升,主要表现在生菜中硝态氮含量仅为营养液组的2.11%~4.02%。

(4)综合考虑生菜的外观品质、相对生长量、营养及卫生品质,脱氨沼液可以代替化学营养液用于水培生菜,且5~10倍稀释可能为最佳的脱氨沼液水培生菜稀释比例。

### 参考文献:

- [1] Tan F, Wang Z, Zhouyang S Y, et al. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221(12):385-393.
- [2] 陈超,阮志勇,吴进,等. 规模化沼气工程沼液综合处理与利用的研究进展[J]. *中国沼气*, 2013, 31(1):25-28.  
CHEN Chao, RUAN Zhi-yong, WU Jin, et al. Research progress on the comprehensive disposal and utilization of biogas slurry from large scale biogas engineering[J]. *China Biogas*, 2013, 31(1):25-28.
- [3] 杨鑫,胡笑涛,王文娥. 沼液水培蔬菜的研究进展[J]. *北方园艺*, 2015(18):199-202.  
YANG Xin, HU Xiao-tao, WANG Wen-e. Research progress on biogas slurry hydroponic vegetable[J]. *Northern Horticulture*, 2015(18):199-202.
- [4] Tampio E, Lehtonen E, Kinnunen V, et al. A demand-based nutrient utilization approach to urban biogas plant investment based on regional crop fertilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164(10):19-29.
- [5] Dai Q Y, Chen Y G, Zhou W P, et al. Studies on the purification of silver-containing wastewater and the reclamation of silver by water hyacinth and other aquatic plants[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 16(2):167-173.
- [6] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 二版. 北京:中国农业出版社, 2014.  
GUO Shi-rong. Soilless culture[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [7] 田霄鸿,李生秀,宋书琴. 碳酸氢根和铵态氮共同对菜豆生长及养分吸收的影响[J]. *园艺学报*, 2002, 29(4):337-342.  
TIAN Xiao-hong, LI Sheng-xiu, SONG Shu-qin. Effect of coexistence of bicarbonate and ammonium in nutrient solution on growth and nutrient uptake of kidney beans[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, 29(4):337-342.
- [8] Goddek S, Schmautz Z, Scott B, et al. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce[J]. *Agronomy*, 2016, 6(2):37-49.
- [9] 隋倩雯,董红敏,朱志平,等. 沼液深度处理技术研究与应用现状[J]. *中国农业科技导论*, 2011, 13(1):83-87.  
SUI Qian-wen, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, et al. Present status of biogas effluent treatment technology research and application[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1):83-87.
- [10] 贺清尧,冉毅,刘璐,等. 生物质灰致沼液氮磷脱除研究[J]. 农

- 业机械学报, 2017, 48(1):237-251.
- HE Qing-yao, RAN Yi, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen and phosphorous removal from biogas slurry induced by biomass ash addition[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1):237-251.
- [11] 贺清尧, 王文超, 刘璐, 等. 沼液氨氮减压蒸馏分离性能与反应动力学[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17):191-197.
- HE Qing-yao, WANG Wen-chao, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen separation performance and kinetics from biogas slurry using vacuum distillation method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17):191-197.
- [12] 贺清尧, 王文超, 蔡凯, 等. 减压浓缩对沼液CO<sub>2</sub>吸收性能和植物生理毒性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2):200-207.
- HE Qing-yao, WANG Wen-chao, CAI Kai, et al. Effect of vacuum concentration on CO<sub>2</sub> absorption performance and phytotoxicity of biogas slurry[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):200-207.
- [13] Migo V P, Matsumura M, Del Rosario E J, et al. Decolorization of molasses wastewater using an inorganic flocculant[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1993, 75(6):438-442.
- [14] 喻景权, 王秀峰. 蔬菜栽培学总论[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- YU Jing-quan, WANG Xiu-feng. Vegetable cultivation (general introduction)[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [15] Krishnasamy K, Nair J, Bäuml B. Hydroponic system for the treatment of anaerobic liquid[J]. *Water Science & Technology*, 2012, 65(7):1164-1171.
- [16] 张绍博, 杨志敏, 陈玉成, 等. 观赏植物对沼液的净化效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5):2061-2066.
- ZHANG Shao-bo, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, et al. Purification capacities of ornamental plants to biogas slurry[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(5):2061-2066.
- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- WANG Xue-kui. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [18] Avis T J, Gravel V, Antoun H, et al. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7):1733-1740.
- [19] 农业部. GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 2005.
- Ministry of Agriculture of the PRC. GB 5084—2005 Standards for irrigation water quality[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC, 2005.
- [20] 叶晶, 苗纪法, 黄宇民, 等. 沼液灌溉对茼蒿重金属含量及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7):96-99.
- YE Jing, MIAO Ji-fa, HUANG Yu-min, et al. Effects of biogas slurry irrigation on heavy metal content and yield of lettuce[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(7):96-99.
- [21] 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):83-86.
- SHEN Qi-lin, SHAN Sheng-dao, ZHOU Jian-ju, et al. Determination and analysis of compositions in biogas slurry produced by swine manure digestion[J]. *China Biogas*, 2014, 32(3):83-86.
- [22] 周彦峰, 丘凌, 李自林, 等. 沼液用于无土栽培的营养机理与技术优化[J]. 农机化研究, 2013(5):224-227.
- ZHOU Yan-feng, QIU Ling, LI Zi-lin, et al. Progress of biogas slurry soilless culture and optimization technology[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(5):224-227.
- [23] Sánchez-González M J, Schouten R E, Tijskens L M M, et al. Salinity and ripening on/off the plant effects on lycopene synthesis and chlorophyll breakdown in hybrid Raf tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 211(11):203-212.
- [24] 李文哲, 徐名汉, 李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):135-142.
- LI Wen-zhe, XU Ming-han, LI Jing-yu. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5):135-142.
- [25] Voitsekhovskaja O V, Tyutereva E V. Chlorophyll b in angiosperms: Functions in photosynthesis, signaling and ontogenetic regulation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 189(9):51-64.
- [26] Bahadoran Z, Mirmiran P, Jeddi S, et al. Nitrate and nitrite content of vegetables, fruits, grains, legumes, dairy products, meats and processed meats[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, 51(6):93-105.
- [27] 别之龙, 徐加林, 杨小峰. 营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊):109-112.
- BIE Zhi-long, XU Jia-lin, YANG Xiao-feng. Effects of different nutrient solution concentrations on the growth and nitrate accumulation of hydroponic lettuce[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Suppl):109-112.
- [28] 薛延丰, 李慧明, 石志琦. 蓝藻发酵沼液对青菜生物学特性和品质的影响初探[J]. 江西农业学报, 2009, 21(10):59-62.
- XUE Yan-feng, LI Hui-ming, SHI Zhi-qi. Effects of biogas slurry of blue-green algae on biological characteristics and quality of Chinese cabbage[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(10):59-62.
- [29] 赵莉, 于建光, 常志州, 等. 施用沼液对水芹产量及品质的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1):94-99.
- ZHAO Li, YU Jian-guang, CHANG Zhi-zhou, et al. Effect of biogas slurry on the growth and quality of *Oenanthe javanica*[J]. *Soils*, 2014, 46(1):94-99.