

# 以沼液为基质的小葱水培营养液配方研究

谢琳玉, 王铭愉, 梁兰梅, 张云红\*

(农业部成都沼气科学研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 沼液富含植物生长所需的多种营养物质与活性物质, 将沼液用于水培蔬菜, 可以获得良好的经济效益与生态效益。较高的氨氮浓度以及不均衡的营养元素是制约沼液作为营养液用于水培植物的关键因素。针对该问题, 以小葱为研究对象, 探究了不同初始氨氮浓度与不同营养元素添加对小葱生长状况的影响, 获得了以沼液为基质的小葱水培营养液配方。该配方为: 氨氮浓度为  $850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的沼液稀释 5~6 倍, 添加磷酸二氢钾  $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、氯化钾  $340 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、七水硫酸镁  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、氯化钙  $180 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、微肥  $0.1 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此配方下以沼液为基质的小葱水培营养液中含氮  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、磷  $42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钾  $310 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钙  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、镁  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、硫  $65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、铁  $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、铜  $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、锌  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、锰  $0.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钼  $0.005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、硼  $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

**关键词:** 沼液; 水培; 营养液; 氨氮; 小葱; 价值

中图分类号: S216.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)06-0062-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023060062

**Study on the Formula of Hydroponic Nutrient Solution of *Allium schoenoprasum* L. Based on Liquid Digestate / XIELinyu, WANG Mingyu, LIANG Lanmei, ZHANG Yunhong\* / (Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610041, China)**

**Abstract:** Liquid digestate is rich in many nutrients and active substances needed for plant growth. The use of liquid digestate in hydroponic vegetables can obtain high economic and ecological benefits. High concentration of ammonia nitrogen and unbalanced nutrient elements are the key factors that restrict the application of liquid digestate as nutrient solution for hydroponic plants. In order to solve this problem, this paper investigated the effects of different initial ammonia nitrogen concentrations and different nutrient additions on the growth of *Allium schoenoprasum* L. The formula of hydroponic nutrient solution of *Allium schoenoprasum* L. based on liquid digestate was obtained. The formula is as follows: dilute the liquid digestate with an ammonia nitrogen concentration of  $850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  by 5~6 times, add  $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ ,  $340 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ KCl}$ ,  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $180 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CaCl}_2$  and  $0.1 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$  microelement fertilizer. Under this formula, the hydroponic nutrient solution of *Allium schoenoprasum* L. based on liquid digestate contained  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ N}$ ,  $42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ P}$ ,  $310 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ K}$ ,  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Ca}$ ,  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Mg}$ ,  $65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ S}$ ,  $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Fe}$ ,  $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Cu}$ ,  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Zn}$ ,  $0.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Mn}$ ,  $0.005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Mo}$ , and  $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \text{ B}$ .

**Key words:** liquid digestate; hydroponics; nutrient solution; ammonia nitrogen; *Allium schoenoprasum* L.; value

我国是畜禽养殖大国, 畜禽养殖业已成为农民增收的重要来源与农村经济发展的重要支柱。沼气发酵技术因其高效降解污染物的同时又可产生清洁能源等诸多优势, 仍为我国畜禽粪污处理利用的主流技术。然而, 沼气发酵通常会大量产生沼液, 因沼液中含有较高浓度的有机污染物<sup>[1-3]</sup>, 若沼液得不到有效的处理利用, 势必造成环境污染。目前, 沼液的处置途径主要包括达标处理及还田利用。由于

较大的投资以及较高运行水平的需求, 沼液达标处理并不能全面推广; 同时, 有些养殖场并未配套足够的消纳土地或远离种植区, 呈现出畜禽养殖业与种植业脱节的现象, 导致沼液直接排入环境, 既浪费资源又污染周边土壤及水体。因此, 寻求一种既能实现沼液资源化又能减轻环境污染的技术迫在眉睫。

水培作为一种新型环保的现代植物无土栽培技术, 可有效解决农作物种植受土地资源短缺及自然

收稿日期: 2023-11-23

项目来源: 四川省科技计划项目(2021ZDZX0012); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610012022010\_03102)。

作者简介: 谢琳玉(1993-), 女, 汉族, 四川绵阳人, 本科, 主要从事畜禽粪污资源化利用等工作, E-mail: 17775524070@163.com

通信作者: 张云红, E-mail: zhangyunhong@caas.cn

条件限制的问题。沼液被称为腐熟的速效水肥,含有丰富的有机质、腐植酸、N、P、K 等营养成分以及维生素、氨基酸、微量元素和酶等生命活性物质<sup>[4-6]</sup>。将沼液用于水培技术,不仅可以解决环境污染问题,同时有利于畜禽养殖业将规模化养殖与沼液利用联合起来,实现零排放的全闭合绿色循环农业模式<sup>[7-8]</sup>。

较高的氨氮浓度以及不均衡的营养条件是制约沼液作为营养液用于植物水培的关键因素<sup>[12-13]</sup>。在植物生长环境中,当氨氮浓度超过阈值时,植物的生长会受到抑制,即引发“铵毒害”的产生,铵毒害会导致农作物减产、生物量减少、根系腐烂等。不均衡的营养条件,无法满足植物的生长需要,导致植株瘦弱、叶片发黄、生长缓慢等。基于此,文章以小葱为研究对象,采用稀释沼液的方式使初始氨氮浓度保持在 50、100、150 mg·L<sup>-1</sup>,并参照山崎营养液配方补齐大量元素、中量元素以及微量元素,对比分析小葱生长指标、品质指标,从中选取以沼液为基质的小葱水培配方,为沼液的高值利用提供新的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 沼液与水

试验所用的猪场沼液均取自于四川省成都市新都区某猪场,运输至试验基地后测试样品基础指标,并于室温下储存于沼液桶中。因试验周期较长,每次用于添加的沼液基础理化指标会略有波动。本试验用水均为试验基地自来水。

沼液的基本理化性质: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(850.0 ± 53.2 mg·L<sup>-1</sup>)、COD(905.3 ± 62.1 mg·L<sup>-1</sup>)、K(558.5 ± 23.4 mg·L<sup>-1</sup>)、P(80.3 ± 6.9 mg·L<sup>-1</sup>)、Ca(90.1 ± 5.9 mg·L<sup>-1</sup>)、Mg(28.0 ± 2.6 mg·L<sup>-1</sup>)、S(44.0 ± 2.8 mg·L<sup>-1</sup>)、Fe(0.085 ± 0.007 mg·L<sup>-1</sup>)、Cu(0 mg·L<sup>-1</sup>)、Zn(0 mg·L<sup>-1</sup>)、Mn(0.17 ± 0.01 mg·L<sup>-1</sup>)、B(0.4675 ± 0.03 mg·L<sup>-1</sup>)、Mo(0.0408 ± 0.005 mg·L<sup>-1</sup>)。

#### 1.1.2 小葱种苗

小葱种苗选择市场较常见品种,购买于蔬菜种子批发市场。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 试验装置与操作方法

水培装置:采用水培箱、漂浮板、定植篮构建水培试验装置。水培箱尺寸为 76 cm × 56.5 cm ×

32.5 cm,漂浮板开孔尺寸为直径 4 cm 的圆,一张漂浮板含 24 孔。

操作方法:水培箱中水培液的深度为 15 cm。营养添加包括沼液添加与营养元素添加,主要按以下两种方式进行:

(1) 以初始氨氮浓度为基准,每隔 10 天添加 1 次沼液,以补齐沼液中氨氮的含量。

(2) 以山崎营养液为基准,仅在试验初始时添加营养元素,以补齐沼液中除氮以外的其余所有营养元素。添加营养元素浓度见表 1。

表 1 添加营养元素浓度 (mg·L<sup>-1</sup>)

元素名称	初始氨氮 50	初始氨氮 100	初始氨氮 150
P	9.02	18.04	27.06
K	71.41	142.83	214.24
Ca	21.37	42.73	64.10
Mg	14.35	28.71	43.06
S	18.75	37.49	56.24
Fe	4.5648	4.5648	4.5648
Cu	0.0204	0.0204	0.0204
Zn	0.0500	0.0500	0.0500
Mn	0.5246	0.5246	0.5246
Mo	0.0049	0.0049	0.0049
B	0.5000	0.5000	0.5000

#### 1.2.2 试验组别

试验共设置 12 组,水培液初始氨氮浓度分别为 50、100、150 mg·L<sup>-1</sup>,每个初始氨氮浓度组包括不添加营养元素,以及补齐微量、中微量、大中微量元素 4 个类别,每个试验组别设置 3 组平行。试验设置详见表 2。

#### 1.2.3 分析方法

沼液及水培液理化指标:采用纳氏试剂光度法测定沼液中的氨氮含量;采用重铬酸钾比色法测定沼液 COD 含量;采用雷磁 pH 计和雷磁 EC 仪测定沼液 pH 值和 EC。

蔬菜生长指标:收获时测定水培小葱的株高及产量。株高测定方法:以定植篮上方为株高的下端,植株的最高一个茎节点为株高的上端,采用卷尺进行测量。产量测定方法:以每个水培箱中收获的小葱的整体重量为一个产量值。

蔬菜品质指标:收获时称取一定克数的鲜样,于 -80℃ 冰箱中储存,作为品质指标的待测样。采

表2 试验组别

组别	初始氨氮浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	营养元素添加类别		
		微量	中量	大量
T1	50	—	—	—
T2		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	—	—
T3		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	—
T4		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	P、K
T5	100	—	—	—
T6		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	—	—
T7		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	—
T8		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	P、K
T9	150	—	—	—
T10		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	—	—
T11		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	—
T12		Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B	Ca、Mg、S	P、K

用紫外光度法测量叶片中的叶绿素,采用萘酚比色法测定可溶性糖含量,采用福林酚法测定可溶性蛋白质<sup>[14]</sup>,采用钼蓝比色法测定还原性维生素C<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.4 沼液稀释倍数计算公式

沼液水培小葱过程中,经过了多次沼液添加。整个水培过程中,沼液的稀释倍数核算见如下公式:

$$\text{稀释倍数} = \frac{\text{沼液添加体积} + \text{稀释水添加体积}}{\text{沼液添加体积}}$$

沼液添加体积:整个水培过程中,沼液添加的总体积;稀释水添加体积:整个水培过程中,自来水添加的总体积。

## 2 结果与分析

### 2.1 小葱生长状况研究

#### 2.1.1 小葱产量

小葱水培时间为11月5日~12月25日,共计50天后收获,随机选取植株进行拍照记录。如图1小葱的生长状况所示,相同初始氨氮浓度条件下,随着添加元素的增加,小葱的生长状况呈现逐渐变好的趋势。结合图2,随着添加元素的增多,小葱的产量呈现逐渐增大的趋势。在3种初始氨氮浓度条件下,当补齐大中微量元素时,小葱的产量均可达到 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;未添加任何元素的条件下,小葱产量最低,分别为 $20.46$ 、 $26.15$ 、 $26.16\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。结果表明,沼液所含营养元素并不均衡,单纯以沼液作为水培营养液不能完全满足小葱的生长需求,植株呈现出矮小发黄的状态。参照山崎营养液配方补齐营养元素后,植株生长所需元素得到满足,生长状况变好,呈现粗壮深绿的状态。

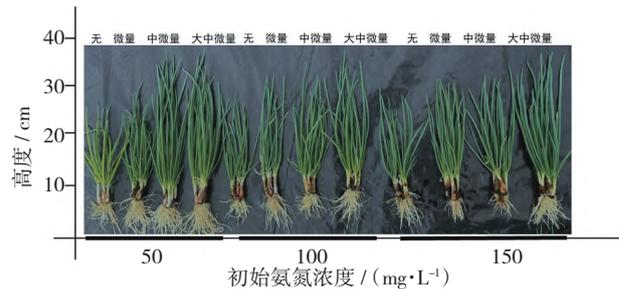


图1 小葱生长情况

有研究表明,水培液中较高的氨氮浓度会对植株产生一定的毒害作用,从而抑制植株的生长<sup>[16-17]</sup>。如图1所示,同种营养元素添加条件下,氨氮浓度越低,小葱生长状况越好,根系越发达;氨氮浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小葱的整体生长状况最佳,优于氨氮浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮浓度条件下,不添加营养元素组以及只补齐微量与中微量元素组,主根较短,侧根较少;补齐大中微量元素组根系较发达,与 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮组根系相差不大。以上结果表明,沼液中未添加足量的营养元素时,较高的氨氮浓度会抑制植株的生长;当参照山崎营养液配方补齐营养元素时,氨氮的抑制作用会得以缓解。

#### 2.1.2 小葱品质

随着生活条件的改善,蔬菜品质越来越受到人们的关注,食品标准中常以维生素C、可溶性糖、可溶性蛋白作为蔬菜品质的评判依据<sup>[18]</sup>。为了探究营养元素的添加对沼液水培小葱的品质调控作用,测定与分析了小葱的可溶性糖、可溶性蛋白以及维生素C含量。如图3所示,3种初始氨氮浓度条件

下,添加大中微量元素组的可溶性糖含量显著高于不添加、添加微量、中微量组。这一结果说明沼液水培小葱体系中,添加大中微量元素,可以显著增加小葱中可溶性糖的含量,其余组别没有显著差异。如图4所示,添加大中微量元素组的可溶性蛋白含量显著高于不添加、添加微量、中微量组,其余组别无明显差异。结果表明添加大量元素可显著增加可溶性蛋白含量,在沼液水培小葱体系中,大量元素(P、K)是提高可溶性蛋白含量的关键营养元素<sup>[19-20]</sup>。如图5所示,随着氨氮浓度的增高,维生素C含量呈缓慢增大的趋势。氨氮浓度越高,沼液的使用量

越大,说明沼液水培小葱可以显著提高其维生素C含量,与他人的研究结果一致<sup>[21]</sup>。

### 2.1.3 小葱光合色素

植物光合色素主要包括叶绿素、类胡萝卜素和藻胆素等,其中高等绿色植物的光合色素主要是叶绿素<sup>[22-23]</sup>。根据小葱的叶绿素结果分析(见图6)3种沼液氨氮浓度条件下,不添加营养元素组的叶绿素显著低于补齐营养元素组;补齐微量、中微量、大中微量元素组中叶绿素含量无显著差异。结果说明补齐微量元素、中微量元素以及大中微量元素对小葱的光合作用具有显著的促进作用。据文献报道对植物光合作用起到主要调控作用的是微量元素,微量元素中含有螯合铁,铁是参与叶绿素合成的重要元素。同时,Fe、Mn、Cu、Zn等是叶绿素生物合成中某些酶的活化剂,具有催化功能,在叶绿素形成中起辅助作用<sup>[18]</sup>。

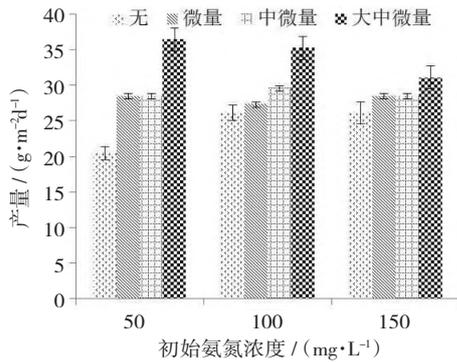


图2 小葱的产量

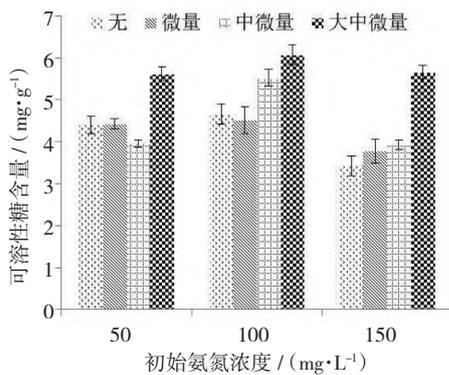


图3 小葱的可溶性糖含量

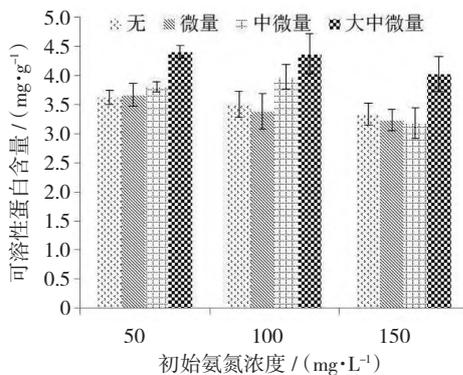


图4 小葱的可溶性蛋白含量

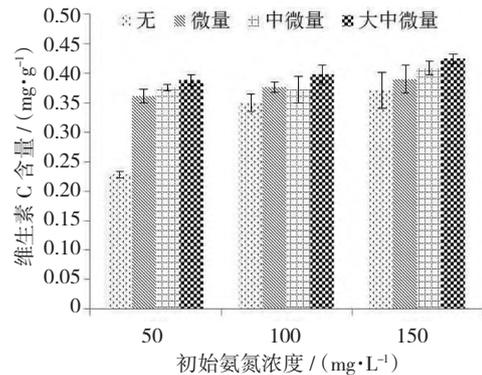


图5 小葱的维生素C含量

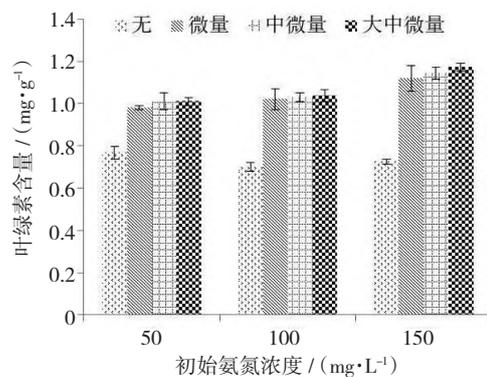


图6 小葱的叶绿素含量

未添加营养元素的水培组别中,叶绿素含量都相对较低,可能是由于沼液中缺乏叶绿素合成所需的营养元素,导致植株叶片枯黄<sup>[24-25]</sup>。因此在以沼液为基质的水培蔬菜过程中,测定沼液的基础理化性质是必要过程,在此基础上补充微量元素可以

显著增加蔬菜中的叶绿素含量。

## 2.2 沼液水培小葱配方

本试验参照山崎营养液,向水培体系中补齐大量元素、中量元素、微量元素,根据小葱的生长状况与品质指标,并结合沼液的消纳量,选取初始氨氮浓度稀释至  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的沼液并同时补齐大中微量元素作为以沼液为基质的小葱水培配方,种植过程中每隔 10 天补充沼液使水培液氨氮浓度保持在  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,具体配方为:氨氮浓度为  $850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的沼液稀释 5~6 倍,添加磷酸二氢钾  $120 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、氯化钾  $340 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、七水硫酸镁  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、氯化钙  $180 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、微肥  $0.1 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此配方下以沼液为基质的小葱水培营养液中含氮  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、磷  $42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钾  $310 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钙  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、镁  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、硫  $65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、铁  $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、铜  $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、锌  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、锰  $0.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、钼  $0.005 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、硼  $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

小葱的水培周期约为 50 天,整个周期中共添加了 5 次沼液与 1 次自来水,根据稀释倍数公式计算出小葱一个水培周期中沼液的稀释倍数。如图 7 所示,水培液的初始氨氮浓度越高,沼液稀释倍数越小,初始氨氮浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,沼液稀释倍数介于 8~9;初始氨氮浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,沼液稀释倍数为 5 左右;当初始氨氮浓度为  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,沼液稀释倍数小于 4。结果表明,在不影响植物正常生长的情况下,越高的水培液初始氨氮浓度越利于沼液的消纳。本试验选取的以沼液为基质的小葱水培配方,沼液的最终稀释倍数为 3.89。

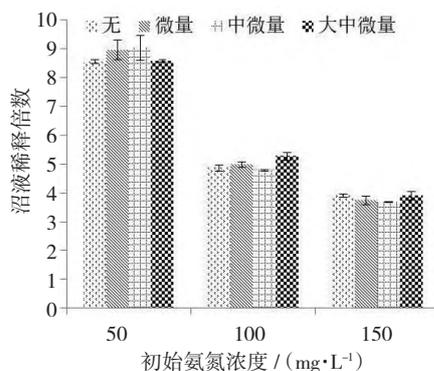


图 7 沼液稀释倍数

## 2.3 沼液作为水培基质的价值

根据选定的以沼液为基质的小葱水培配方,核算沼液替代营养液量,根据替代的营养液价值评估沼液价值。由水培配方可以看出,在沼液基础上,

需要补充大量元素 P、K,中量元素 Ca、Mg、S,微量元素 Fe、Cu、Zn、Mn、Mo、B,补充营养物的质量与价格见表 3。经过市场调研,全部使用营养液水培蔬菜,营养液购买价格每亩每批约为 1000 元。经过核算,整个小葱水培周期内,折合共用沼液每亩每批约 15 t,共用补充营养物的价格每亩每批约 360 元,即 15 t 沼液代替了 640 元的营养物,除去沼液运输成本每吨 10 元,沼液的价值每吨约 32.7 元。

表 3 补充营养物的质量与价格

补施肥名称	补施量	补施肥单价	价格
	( $\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$ )	( $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	( $\text{元} \cdot \text{亩}^{-1}$ )
磷酸二氢钾	11.89	9	107.0
氯化钾	34.05	2.6	88.5
七水硫酸镁	15.4	4	61.6
氯化钙	17.75	5.2	92.3
微肥	30~50 $\text{mL} \cdot \text{亩}^{-1}$	44 $\text{元} \cdot \text{L}^{-1}$	10.0
合计			359.4

注:微肥,即微量元素肥,主要包括铁、铜、锌、锰、钼、硼等微量元素。

## 3 结论

研究表明,在 3 种氨氮浓度条件下,补齐大中微量元素,小葱的产量均可达到  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,未添加任何元素的条件下小葱产量最低。添加大中微量元素组的可溶性糖与可溶性蛋白含量均显著高于不添加、添加微量、中微量组。随着氨氮浓度的增高,维生素 C 含量呈缓慢增大的趋势。在同种氨氮浓度条件下,添加微量、中微量、大中微量元素组中叶绿素含量无显著差异,且均显著高于不添加营养元素组。结合小葱生长状况、品质与沼液消纳情况,选定初始氨氮浓度稀释至  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的沼液并同时补齐大中微量元素作为以沼液为基质的小葱水培营养液配方。采用此配方水培小葱一个周期,沼液的最终稀释倍数为 3.89。沼液代替营养物产生较高价值,可达每吨约 32.7 元。

## 参考文献:

- [1] 惠晓红,刘则学,张妮娅,等.湖北省集约化生猪生产系统的环境影响评估[J].农业工程学报,2016,32(13):183-189.
- [2] 王敏锋,严正娟,陈硕,等.施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(07):1351-1359.

- [3] 于乐. 基于农田安全利用的猪粪沼液施用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.
- [4] 刘炳妤, 王一佩, 姚作芳, 等. 沼液还田下不同种植模式的重金属风险评价及安全消纳量分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(08): 1507-1515.
- [5] 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(03): 83-86.
- [6] 尹晓明, 王荣江, 徐潇潇, 等. 猪粪堆肥过程中养分和重金属含量的动态变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(02): 254-263.
- [7] 徐成玉. 沼气工程沼液用于高效养殖小球藻可行性探究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [8] 赵立欣, 宋成军, 董保成, 等. 基于微藻养殖的沼液资源化利用与高价值生物质生产耦合技术研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(03): 61-65.
- [9] 康群. 沼液水培植物的环境胁迫与生理适应研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2019.
- [10] 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(04): 788-795.
- [11] 杨鑫. 沼液对水培生菜生理生长及营养液特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [12] 张婧. 铵硝氮素比例影响辣椒生长与果实代谢的机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [13] 汪建飞. 营养液不同铵硝比对菠菜产量和品质影响的机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [14] 金星. 不同沙藏处理对胡桃楸种子生理代谢及萌发影响[J]. 辽宁林业科技, 2022(06), 32-34.
- [15] 卢青, 何季, 吴传美, 等. 不同植茶年限下四球茶茶园土壤性状及茶叶品质特征[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(02), 168-175.
- [16] 王波. 不同生菜品种对不同铵硝比反应差异及其机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [17] 陈敏娇. 畜禽养殖污水植物净化与资源化利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [18] 邓丽娟, 焦小强. 氮管理对冬小麦产量和品质影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2355-2365.
- [19] 岳胜兵. 沼液作为水培生菜营养液的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [20] 施卫明, 李光杰, 艾超, 等. 中国植物营养生物学研究重要进展和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2310-2323.
- [21] 杨东杰. 沼液稳定性处理对生菜农学效应的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [22] 李然, 余雪标, 高刘, 等. 畜禽粪便沼液肥对苦瓜光合作用产量的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(02): 110-114.
- [23] 王文琳, 周长芳, 周屿, 等. 沼液对水培蔬菜生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 114-117.
- [24] 刘扬. 小麦种子萌发及幼苗生长对高铵胁迫的响应机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [25] 欧小宏. 三七铵毒害产生机制及缓解措施研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.