

周明炆, 付洋, 成立文, 等. 基于偏最小二乘判别分析研究铜藻液体肥对 3 种蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (1): 116–126.

ZHOU M Y, FU Y, CHENG L W, et al. Evaluation of *Sargassum horneri* Liquid Fertilizer for Vegetable Seed Germination and Seedling Growth [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (1): 116–126.

## 基于偏最小二乘判别分析研究铜藻液体肥对 3 种蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响

周明炆<sup>1,2</sup>, 付洋<sup>1</sup>, 成立文<sup>1</sup>, 曾美端<sup>1</sup>, 曾庆淞<sup>1</sup>, 郑毅<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建师范大学生命科学学院, 福建 福州, 350117; 2. 福建师范大学工业微生物教育部工程研究中心, 福建 福州 350117)

**摘要:**【目的】铜藻为沿海常见的低质海藻, 为实现铜藻高质利用, 以新鲜铜藻为原料制备铜藻液体肥, 研究其对上海青、黄瓜和番茄等 3 种蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响, 并基于偏最小二乘判别分析 (Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA) 探究铜藻液体肥增肥的生物学效应。【方法】采用酶法和发酵法 2 种工艺制备铜藻液体肥, 并各设置 5 组稀释倍数 (200 倍、400 倍、600 倍、800 倍和 1000 倍) 进行种子萌发试验和幼苗盆栽试验。【结果】(1) 种子萌发试验中, 发酵法制备铜藻液体肥的 200 倍液、600 倍液在上海青种子萌发上效果最佳, 发芽指数较空白组显著提高 11.8%, 较两组阳性对照分别提高 1.9% 和 1.3%; 发酵制备的 200 倍液对黄瓜种子萌发影响最好, 发芽指数较空白和两组阳性对照均显著提高, 增幅分别达 33.0%、21.0% 和 6.7%; 发酵制备的 1000 倍液在番茄种子萌发上成效最佳, 发芽指数较空白和两组阳性对照分别显著提升 13.6%、14.4% 和 19.3%。(2) 幼苗盆栽试验中, 相关性分析结果表明各生长指标间普遍存在极显著正相关性, 主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 结果显示铜藻液体肥对 3 种蔬菜的影响作用各有差异, 构建实验样品的 PLS-DA 模型分析不同制备方法的铜藻液体肥肥效并与阳性对照对比, 结果表明发酵制备的 400 倍液对上海青幼苗促生效果最佳, 各指标均显著高于阳性对照海藻肥, 其中根鲜重提高最显著, 增幅为 144%; 酶法制备的 800 倍液对黄瓜幼苗生长效果最好, 各指标均显著高于阳性对照海藻肥, 其中根长提高最显著, 增幅为 28%; 发酵制备的 600 倍液对番茄幼苗作用效果最好, 各指标均显著高于阳性对照海藻肥, 其中株干重提高最显著, 增幅为 31%。【结论】铜藻液体肥具备很好的增肥生物学效应, 发酵法制备的铜藻液体肥肥效普遍优于酶法制备, 施用前者能提高种子萌发率, 促进幼苗地上部分和地下部分的生长, 以上结果为海藻液体肥的生产与应用提供科学数据。

**关键词:** 铜藻液体肥; 偏最小二乘判别分析; 种子萌发; 幼苗生长指标

中图分类号: S 145.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 01-0116-11

### Evaluation of *Sargassum horneri* Liquid Fertilizer for Vegetable Seed Germination and Seedling Growth

ZHOU Mingyang<sup>1,2</sup>, FU Yang<sup>1</sup>, CHENG Liwen<sup>1</sup>, ZENG Meiduan<sup>1</sup>, ZENG Qingsong<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China; 2. Fujian Engineering Research Center of Industrial Microbiology, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China)

**Abstract:** 【Objective】Effects of the liquid fertilizer made from *Sargassum horneri* for vegetable seed germination and seedling growth were evaluated. 【Methods】The liquid fertilizers prepared by either enzymatic digestion or fermentation of *S. horneri*, a low-quality seaweed commonly found in the coastal areas, in a gradient of concentrations were applied on bok choy (*Brassica chinensis*), cucumber, and tomato to determine the fertilization effects on the vegetable seed germination and subsequent seedling growth in a pot experiment. Data collected were statistically analyzed by the partial least squares

收稿日期: 2022-04-11 初稿; 2022-08-12 修改稿

作者简介: 周明炆 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 应用与环境微生物 (E-mail: 1263202739@qq.com)

\* 通信作者: 郑毅 (1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物工程 (E-mail: eyizheng@fjnu.edu.cn)

基金项目: 福建省海洋高新技术产业发展专项项目 (闽海洋高新 (2015) 11 号)

discriminant analysis (PLSDA). 【Results】 (1) The 200x and 600x liquid fertilizer dilutions delivered the best effects on the germination of bok choy seeds with a significantly increased germination index by 11.8% over that of blank control and by 1.9% and 1.3% over those of two positive controls. On the germination of cucumber seeds, the 200x dilution had the best effect with a significantly higher index than that of blank control by 33.0% and 21.0% and by 6.7% over those of two positive controls. For the germination of tomato seeds, the 1,000x dilution performed best with a significantly increased index over that of blank control by 13.6% and by 14.4% and 19.3% over those of the two positive controls. (2) The growth indicators of the potted seedlings were significantly correlated. The effects of the liquid fertilizer on the growth of 3 vegetable categories varied, as shown by the principal component analysis (PCA). According to the PLSDA models, the fermented liquid fertilizer at 400x dilution was superior in promoting the growth of bok choy seedlings with all indices significantly higher than those of the positive control, especially, a 144% increase on fresh root weight. And at 600x dilution, the fermented liquid fertilizer had all indices on the tomato seedlings significantly higher than those of control and the highest dry plant weight that was 31% heavier than that of the positive control. In contrast, the enzymatically digested liquid fertilizer at 800x dilution was best for the growth of cucumber seedlings with significantly higher indices on all aspects than the positive control and 28% longer roots than the positive control. 【Conclusion】 The *S. horneri* liquid fertilizers prepared by either fermentation or enzymatic digestion significantly promoted the seed germination and seedling growth of bok choy, cucumber, and tomato in a pot experiment. The fermented fertilizer was more effective than the enzyme-digested counterpart.

**Key words:** *Sargassum horneri* liquid fertilizers; partial least squares discriminant analysis; seed germination; seedling growth index

## 0 引言

【研究意义】铜藻 (*Sargassum horneri*) 属褐藻门 (Phaeophyta) 马尾藻科 (Sargassaceae) 马尾藻属 (*Sargassum*), 是我国重要的大型海藻。据统计, 福建作为国内海藻养殖大省, 截至 2020 年海藻养殖面积高达 44399 hm<sup>2</sup>, 占全国养殖面积的 31.31%<sup>[1]</sup>。随着近年来全球气温上升和海水富营养化加剧, 我国沿海常由于铜藻爆发性增殖引起金潮, 对海岸海藻养殖和海洋生态造成严重影响<sup>[2]</sup>。同时我国是农业大国, 传统肥料的过量使用使化肥带来的作物增产效应不再明显<sup>[3]</sup>, 容易造成资源浪费和生态污染。因此合理利用海藻资源并与农业相结合, 或能满足国家肥料农药减施和保持蔬菜作物高产的要求。【前人研究进展】我国海藻资源丰富, 18000 km 的绵长海岸线为我国的海藻肥产业提供了大量的原材料。目前海藻肥的制备工艺核心是藻体的消解, 其目的是经破碎细胞得到胞内内容物, 同时使细胞中的大分子物质降解为易被施用对象吸收利用的可溶性小分子物质。目前围绕藻体的消解主要有物理提取法、化学水解法以及生物发酵法。物理法主要通过研磨、破碎等物理手段破碎海藻细胞, Sridhar 等<sup>[4]</sup>采用研磨与高压匀浆法将海藻细胞破碎, 经过滤制备海藻浓缩液。化学法则通过添加有机溶剂增溶或酸碱混合溶液进行破壁, 方同光等<sup>[5]</sup>先后用碱液和酸液降解新鲜海藻, 合并 2 次滤液制成海藻提取物。介于物理提取成本高且操作复杂, 化学水解容易破坏藻类细胞内活性物质和造成化学残留, 生物发酵法有望成为海藻肥更理想的制备手段。生物发

酵法即经过以海藻为养分的微生物代谢, 使构成海藻的大分子降解成小分子、水溶性物质, 从而最大限度保留海藻中的生物活性物质。周丽等<sup>[6]</sup>从自然发酵降解的海藻中筛选获得多功能发酵菌种, 与新鲜海藻经二次发酵得到海藻发酵液, 再搭配腐殖酸制备成含腐殖酸型的海藻复合肥。通过田间实验, 发现施用海藻肥的黄瓜植株在生长指标、产量和品质上均有显著提高。目前国内外生物法制备海藻肥还多处于实验室阶段。相比于传统化肥, 海藻肥富含多种营养物质, Sivasankari 等<sup>[7]</sup>从马尾藻提取物中检测出磷、铁、氯、锌等植物生长所需的营养元素。Wajahatullah 等<sup>[8]</sup>总结了海藻肥富含有多种活性物质, 如海藻多糖、海藻酸、海藻多酚、植物激素、甾醇、甜菜碱等, 可刺激植物生长, 改善并提高作物品质和产量。海藻肥还具有广泛的农业价值, Almaroai 等<sup>[9]</sup>研究表明施用 9% 的双眉藻提取物, 洋葱地上部分的指标和地下鳞茎部分的产量均得到了显著提高。管翔宇等<sup>[10]</sup>认为海藻肥能提高黄瓜幼苗细胞内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 的含量, 降低丙二醛 (MDA) 积累, 有效提升黄瓜幼苗的抗逆能力。在粮食生产上, 海藻肥可以通过提高水稻的有效分蘖数来使粮食增产, 当减少肥料施用时, 添加有海藻肥的肥料仍可以促进水稻的结实率<sup>[11]</sup>。前人揭示了海藻肥应用于农业的巨大潜力, 但主要集中于施用效果的研究, 研究结果因应用的海藻肥来源不同而略有不同。【本研究切入点】目前, 关于海藻肥对农作物影响的相关研究较多, 但鉴于海藻肥制备

方法的多样性,针对酶解法和生物发酵法的比较鲜有研究。【拟解决的关键问题】本研究以低质铜藻为原料,采用酶法和发酵法制得铜藻液体肥,通过多元统计分析方法研究铜藻液体肥对 3 种蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响,探究铜藻液体肥的生物学效应,并比较不同制备方法的肥效,以期为铜藻液体肥的农业应用提供科学数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

(1) 海藻液体肥:实验室酶法制备铜藻液体肥(M);发酵法制备铜藻液体肥(J);对照为海藻肥,购自北京雷力海洋生物新产业股份有限公司。

(2) 0.2%  $K_2HPO_4$  溶液(K肥):称取 2 g  $K_2HPO_4$  定容至 1 L 制成 0.2%  $K_2HPO_4$  溶液。

(3) 作物品种:黄瓜(津绿 3 号),番茄(中研 988),小白菜(上海青),购自福建省福州市种子市场。

### 1.2 试验方法

1.2.1 铜藻液体肥制备 (1) 铜藻液体肥 M(酶法制备):取铜藻洗净晾干,经粉碎机打成干粉,过 60 目筛制成铜藻干粉。将铜藻干粉经超声破碎和酶解(纤维素酶:果胶酶:木瓜蛋白酶质量比为 2:2:1)处理,高速冷冻离心机  $10\ 000\ r\cdot min^{-1}$  离心 10 min,取上清液获得酶解铜藻液体肥。

(2) 铜藻液体肥 J(发酵法制备):以制备的酶解铜藻液体肥为原料,经实验室自筛的高效产海藻酸裂解酶菌株<sup>[12]</sup> *Microbacterium paraoxydans* FSZ39 发酵制得酵解铜藻液体肥。发酵条件:初始 pH 7.5、接种量 2%、温度 30 ℃、装液量 100 mL(250 mL 三角瓶)、转速  $160\ r\cdot min^{-1}$ 、时间 48 h。

1.2.2 铜藻液体肥生物学效应 (1) 不同稀释浓度铜藻液体肥对 3 种蔬菜种子萌发的影响:设置 2 种铜藻液体肥 M、J 各 5 组稀释倍数,分别是 200 倍、400 倍、600 倍、800 倍、1000 倍。空白对照为清水组(CK),阳性对照为 K 肥(AC1)和对照海藻肥(AC2)。种子分别在各处理组溶液中浸泡 10 h,作为种子浸种过程,之后用蒸馏水冲洗 3 次后取 100 粒为一组于发芽盒中萌发,放置在 24~26 ℃ 光照培养箱中培养,每天定时浇水换气,每组设 3 个重复。

上海青、黄瓜、番茄分别于第 2 天、第 4 天、第 6 天测定发芽势;第 4 天、第 6 天、第 8 天测定发芽率;最后各自计算发芽指数<sup>[13]</sup>。

(2) 不同稀释浓度铜藻液体肥对 3 种蔬菜幼苗生长的影响:选用 13 个 10 cm 直径的花盆进行盆栽

试验,提前将 3 种蔬菜种子消毒并在不同处理组溶液中浸泡 10 h,浸泡后去除浸泡液,作为种子浸种过程。将浸种后的种子播种于相同土壤质量(200 g)的花盆中,每盆播种 50 粒。每天定时浇 100 mL 清水。幼苗子叶张开后(上海青 7 d,黄瓜 14 d,番茄 14 d),每组取 10 株幼苗用游标卡尺测根长、株高,用万分之一天平测株根鲜重,用坐标纸测定叶面积,最后每组另取 10 株幼苗经 60 ℃ 烘干 24 h 测株根干重。

### 1.2.3 生长参数的测定<sup>[14]</sup>

发芽率(GR)/% =  $G_T/T \times 100$

发芽势(GE)/% = 从开始至发芽高峰的萌发数量/ $T \times 100$

发芽指数(GI) =  $\sum(G_T/D_T)$

$T$  为供试种子总数,  $G_T$  为相应时间的萌发个数,  $D_T$  为发芽时间(d)。

1.2.4 数据分析方法 试验数据用 Excel 进行整理,采用 SPSS 26.0 对 3 种蔬菜的种子萌发和幼苗生长情况进行方差分析和多重比较。基于幼苗生长指标数据进行相关性分析和主成分分析(Principal component analysis, PCA),并在此基础上对 3 种蔬菜幼苗分别进行偏最小二乘法判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)。采用 SPSS 26.0 进行相关性分析,主成分分析和偏最小二乘判别分析通过 Simca 14.1 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 铜藻液体肥对 3 种蔬菜种子萌发的影响

2.1.1 铜藻液体肥对上海青种子萌发的影响 为了探究铜藻液体肥对种子萌发的影响,将上海青种子经不同浓度铜藻肥浸种并放置于发芽盒中萌发,发芽结果如表 1 所示,种子发芽率和发芽势受 2 种处理组的影响大多无显著差异( $P > 0.05$ )。但在发芽指数上,2 种处理组均与清水组差异显著( $P < 0.05$ ),其中酵解组间差异性不大,而酶解组间则差异性显著。发芽指数是种子活力的指标<sup>[15]</sup>,酵解组处理的平均发芽指数(99.65)明显优于酶解组(88.94)和清水组(89.44),其中酵解 200 倍液和 600 倍液在各个指标上均表现最好,发芽指数与清水组相比均提高了 12%,且两者之间无显著差异( $P > 0.05$ )。

K 肥作为种子细胞体内重要酶的活化剂,可使种子呼吸进程加快,产生大量热量,促进种子萌发。对比的阳性对照海藻肥则是市面上广泛应用的有机肥料,在番茄、小麦等农作物种植上均有良好的应用效果<sup>[16]</sup>。在与 K 肥和对照海藻肥的阳性对照

表 1 不同铜藻液体肥对上海青种子萌发的影响  
Table 1 Effects of *S. horneri* liquid fertilizers on bok choy seed germination

处理 Group	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
CK	100.00±0.00 a	98.67±1.15 a	89.44±1.25 d
AC1	99.67±0.58 ab	99.33±0.58 a	98.11±1.4 ab
AC2	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	98.67±1.89 a
M200	100.00±0.00 a	97.33±2.52 ab	73.67±1.04 f
M400	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	94.67±2.02 bc
M600	99.67±0.58 ab	99.67±0.58 a	98.50±1.32 a
M800	100.00±0.00 a	95.67±3.21 b	83.94±1.44 e
M1000	100.00±0.00 a	97.67±2.31 ab	93.92±6.39 c
J200	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
J400	99.33±0.58 b	99.33±0.58 a	99.33±0.58 a
J600	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a
J800	99.67±0.58 ab	99.33±1.15 a	99.44±0.96 a
J1000	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	99.50±0.50 a

表中数据为平均值±标准偏差；同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下表同。  
The data in the table are mean ± standard deviation; different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level. Same for following table.

中，酵解 200 倍液和 600 倍液与两者差异不显著（ $P>0.05$ ），均能对种子萌发起促进作用。

2.1.2 铜藻液体肥对黄瓜种子萌发的影响 将黄瓜种子经不同浓度铜藻肥浸种并放置于发芽盒中萌发，发芽结果由表 2 所示，与清水组对比，铜藻肥各处理对黄瓜种子的发芽率和发芽势没有显著促进作用（ $P>0.05$ ）。但各处理在发芽指数上存在显著差异（ $P<0.05$ ），所有试验组均提高了黄瓜种子的发芽指数，其中酵解 200 倍液处理的种子发芽指数均数最高（92.30），相较清水组（69.38）提高了 33%。在阳性对照中，酵解 200 倍液在发芽率和发芽势上与 K 肥和对照海藻肥差异不显著（ $P>0.05$ ），但在发芽指数上差异显著（ $P<0.05$ ），分别提高了 21% 和 7%。

2.1.3 铜藻液体肥对番茄种子萌发的影响 将番茄种子经不同浓度铜藻肥浸种并放置于发芽盒中萌发，发芽结果由表 3 可知，酶解 600 倍液与酵解 800 倍液的发芽率与清水组存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中酶解 600 倍液处理提高发芽率效果最佳（98%），相比于清水组（89%）提升了 10%。在发芽势上，酶解 600 倍液和酵解 800 倍液和清水组作用差异显著

表 2 施用铜藻液体肥对黄瓜种子萌发的影响  
Table 2 Effects of *S. horneri* liquid fertilizers on cucumber seed germination

处理 Group	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
CK	98.33±0.58 ab	97.67±1.53 a	69.38±3.56 e
AC1	98.00±1.00 ab	97.67±1.53 a	76.28±1.09 d
AC2	97.33±1.53 ab	97.00±2.00 a	86.48±2.42 bc
M200	98.67±2.31 ab	98.00±1.73 a	90.18±3.35 ab
M400	97.67±0.58 ab	96.67±0.58 a	88.33±3.59 abc
M600	98.00±1.73 ab	97.33±1.15 a	77.72±2.45 d
M800	97.00±1.00 ab	96.00±2.00 a	86.86±4.00 bc
M1000	99.67±0.58 a	98.67±0.58 a	90.66±2.40 ab
J200	97.00±1.00 ab	96.33±0.58 a	92.30±2.35 a
J400	97.67±1.53 ab	97.00±1.00 a	83.26±2.45 c
J600	98.33±2.08 ab	97.67±1.53 a	84.44±0.64 c
J800	96.00±1.73 b	95.67±2.08 a	88.09±3.41 abc
J1000	97.00±2.65 ab	95.67±2.31 a	75.51±1.94 d

表 3 施用铜藻液体肥对番茄种子萌发的影响  
Table 3 Effects of *S. horneri* liquid fertilizers on tomato seed germination

处理 Group	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index
CK	89.00±2.65 cd	89.00±2.65 cd	27.26±1.82 bc
AC1	88.00±2.65 d	87.67±2.89 d	27.06±1.08 c
AC2	89.00±2.65 cd	87.33±4.16 d	25.96±1.52 cd
M200	92.33±3.21 bc	92.33±3.21 bc	31.96±0.53 a
M400	93.00±1.73 bc	92.67±2.08 bc	23.16±0.70 d
M600	98.00±1.73 a	98.00±1.73 a	25.25±1.46 cd
M800	92.67±3.79 bc	91.67±3.06 bcd	25.09±2.56 cd
M1000	91.00±0.00 bcd	91.00±0.00 bcd	25.05±2.93 cd
J200	92.33±0.58 bc	92.00±0.00 bc	30.75±0.28 a
J400	87.67±1.53 d	87.33±1.53 d	30.02±0.69 a
J600	90.33±0.58 cd	90.00±1.00 bcd	24.67±1.41 cd
J800	94.67±1.15 ab	94.00±2.00 b	29.85±1.88 ab
J1000	93.00±1.00 bc	93.00±1.00 bc	30.96±0.90 a

（ $P<0.05$ ），分别提高了 10% 和 6%。在发芽指数上，酶解 200 倍、400 倍液和酵解 200 倍、400 倍、1000 倍液均与清水组作用差异显著（ $P<0.05$ ），其中酵解 1000 倍液较清水组提高最明显（14%）。介于酵解 1000 倍在 3 个发芽指标中均表现突出，能促进种子



的萌发进程，故选用酵解 1000 倍进行阳性对照。

相比 K 肥和对照海藻肥，酵解 1000 倍液在发芽率上与 K 肥差异显著 ( $P<0.05$ )，而与对照海藻肥差异不显著 ( $P>0.05$ )；在发芽势和发芽指数上与两者均存在显著差异 ( $P<0.05$ )，发芽指数分别较 K 肥和对照海藻肥提高了 14% 和 19%

2.2 铜藻液体肥对 3 种蔬菜幼苗生长的影响

植物的地下部分可通过化感促进或自毒作用影响幼苗地上部分的生长<sup>[17]</sup>，考虑到幼苗生长指标间可能存在的相关性，基于盆栽试验中测量的各幼苗

生长数据，进行相关性分析。由表 4 可知，幼苗各生长指标之间存在强相关性，株高与根长、株鲜重、根鲜重、株干重、根干重呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，与叶面积相关不显著 ( $P>0.05$ )；根长与株鲜重、根鲜重、株干重、根干重和叶面积均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，株鲜重与根鲜重、株干重、根干重、叶面积呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )；根鲜重与株干重、根干重和叶面积呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )；株干重与根干重和叶面积呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )；根干重与叶面积呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )。

表 4 幼苗生长指标相关性分析  
Table 4 Correlation among seedling growth indicators

生长指标 growth indicators	株高 Plant height	根长 Root length	株鲜重 Fresh plant	根鲜重 Fresh root	株干重 Dry plant	根干重 Dry root weight	叶面积 Leaf area
株高 Plant height	1						
根长 Root length	0.511**	1					
株鲜重 Fresh plant	0.689**	0.916**	1				
根鲜重 Fresh root	0.423**	0.972**	0.879**	1			
株干重 Dry plant	0.695**	0.893**	0.985**	0.856**	1		
根干重 Dry root weight	0.562**	0.951**	0.945**	0.938**	0.931**	1	
叶面积 Leaf area	-0.088	0.752**	0.574**	0.800**	0.546**	0.684**	1

\*表示在 0.05 水平上显著相关，\*\*表示在 0.01 水平上显著相关。  
\* and \*\* represented significant correlation ( $P<0.05$ ) and extremely significant correlation ( $P<0.01$ ) respectively.

由于生长指标间存在强相关性，直接利用各指标进行独立分析评价势必造成信息的重叠，影响结论的客观性<sup>[18]</sup>，因此采用主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 对生长指标进行综合评判，旨在通过数据降维的方式，将具有多重相关性的特征值简化为多个独立的主成分类型，方便我们观察组间和组内样本的差异性，进行综合评价。

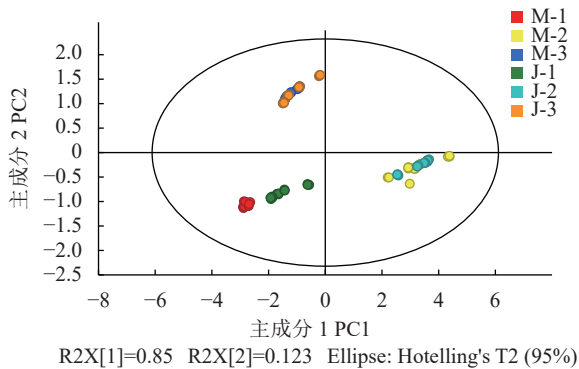
利用 Simca 14.1 构建 3 种蔬菜生长指标 PCA 模型，从图 1 可知，上海青、黄瓜、番茄分别位于第三、第四和第二象限中，相互分离趋势明显，说明这 3 种蔬菜在生长指标上差异较大；而同品种内的样本虽位于同一象限，具有较好聚集性，但各品种的组内样本密集程度不尽相同，表明制备方式的不同将导致铜藻液体肥的肥效产生差异。

由于组间样本和组内样本均存在差异性，考虑到 PCA 属于一种无监督分析，其无法分辨数据的类别信息而仅通过数据的数值信息进行建模，因此采用有监督的偏最小二乘判别分析 (Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)<sup>[19,20]</sup>，在判别分类的基础上更好地探究酶法和发酵法制备对同一品种幼苗的影响大小，旨在筛选出变化差异较大的生长特

征指标和效果最好的处理组。

2.2.1 铜藻液体肥对上海青幼苗生长的影响 通过 Simca 14.1 构建上海青幼苗 PLS-DA 模型，结果如图 2 -A 所示。酵解组 (J) 与酶解组 (M) 和清水组 (CK) 相互分离，说明不同制备方法对生长指标产生了不同影响，其中酵解 400 倍液组 (J400-1、2、3) 单独位于第二象限，表明其数值较其他处理组变化较大，可重点关注。通过 200 次置换检验来验证模型的拟合度如图 2 -B 所示， $R^2=0.0962$ ， $Q^2=-0.56<0$ ，表明模型可靠，无过拟合现象。图 2-C 显示了铜藻液体肥处理下各指标突出变化的程度，重要性因子 (variable importance projection, VIP 值) 可以衡量各幼苗指标对各组样本分类判别的影响强度和解释能力，属于 PLS-DA 模型变量的变量权重值。一般认为 VIP 值  $>1$  的因子可认为是 PLS-DA 模型的差异标志物。图中根长、根鲜重、株干重、根干重、叶面积的 VIP 值均大于 1，说明这些指标在两种制备方法下数值差异较大。

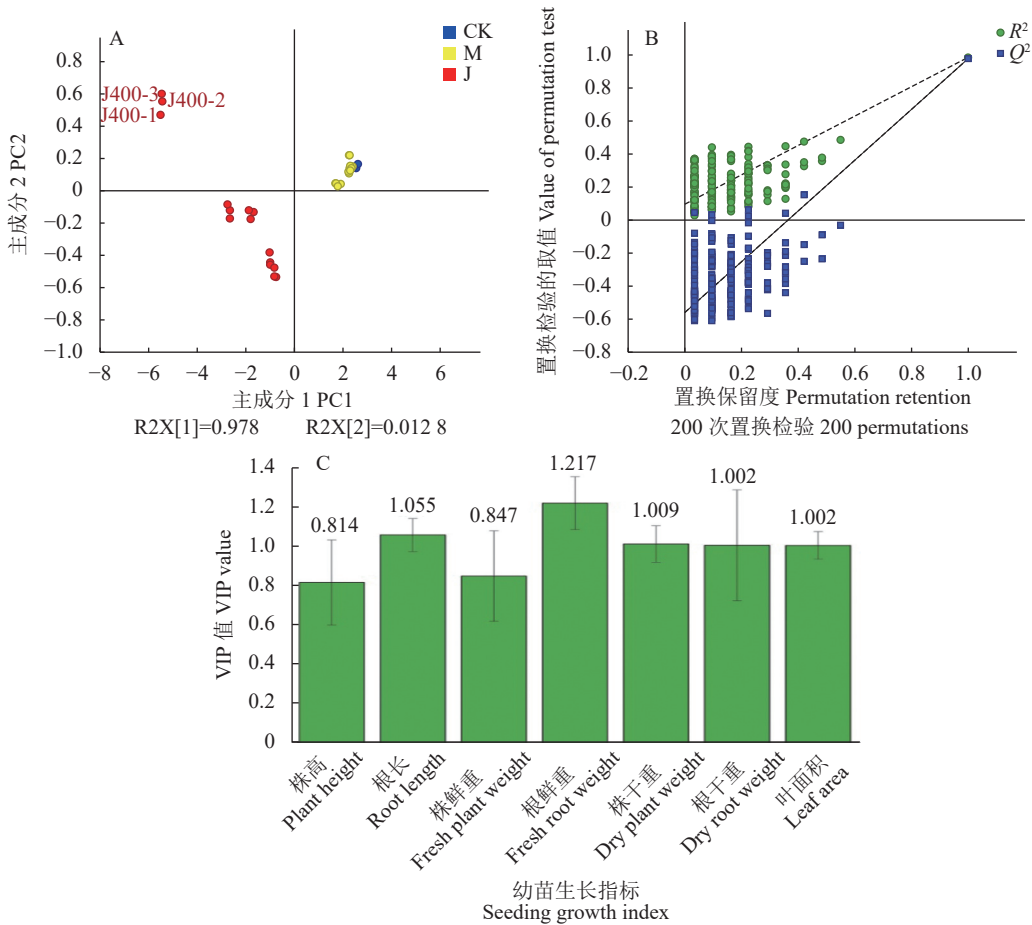
Biplot 图集合了得分图与载荷图的数据信息，将样本与特征变量放在同一张图中，可根据两者之间的距离远近来判断样本中变量的数值高低。为了更



M-1: 上海青+酶解铜藻液体肥; M-2: 黄瓜+酶解铜藻液体肥; M-3: 番茄+酶解铜藻液体肥; J-1: 上海青+酵解铜藻液体肥; J-2: 黄瓜+酵解铜藻液体肥; J-3: 番茄+酵解铜藻液体肥。  
M-1: *B. chinensis* + enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer; M-2: cucumber + enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer; M-3: tomato + enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer; J-1: *B. chinensis* + fermented *S. horneri* liquid fertilizer; J-2: cucumber + fermented *S. horneri* liquid fertilizer; J-3: tomato + fermented enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer.

图 1 铜藻液体肥影响生长指标的主成分得分

Fig. 1 PCA plot on scores of *S. horneri* liquid fertilizer affecting vegetable growth indicators



CK: 清水组; M: 酶解铜藻液体肥; J: 酵解铜藻液体肥。下图同。

CK: blank control; M: enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer; J: fermented *S. horneri* liquid fertilizer. Same for following figures.

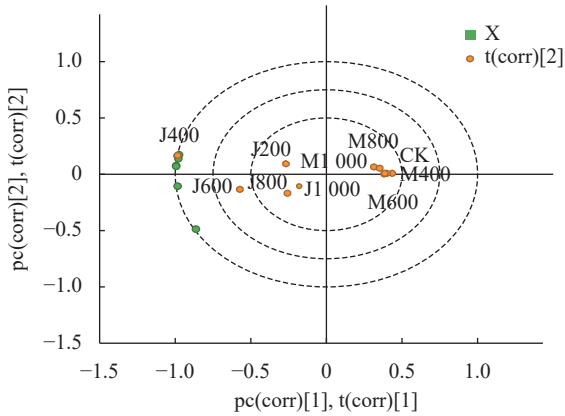
图 2 上海青幼苗生长指标的偏最小二乘法判别分析

Fig. 2 PLSDA on bok choy seedling growth indices

直观地体现各处理组对测量指标的影响效果，判断哪种处理组合肥效最好，我们利用 Biplot 图来筛选最佳处理组，结果如图 3 所示。酵解 400 倍液（J400）与一系列生长特征指标距离最近，表明其对各测量指标提高效果最好。

将酵解 400 倍液进行阳性对照，结果表 5 所示，酵解 400 倍液与 K 肥和对照海藻肥作用差异显著 ( $P<0.05$ )，地上指标（株高、株鲜重、株干重、叶面积）较对照海藻肥依次提高了 54%、45%、58%、126%，地下指标（根长、根鲜重、根干重）较对照海藻肥依次提高了 16%、144%、127%。

2.2.2 铜藻液体肥对黄瓜幼苗生长的影响 利用 Simca 14.1 构建黄瓜幼苗 PLS-DA 模型，结果如图 4 -A 所示，来自不同组的样品分离趋势较好。其中酶解 400 倍液组（M400-1、2、3）、酵解 1000 倍液（J1000-1、2、3）和清水组（CK）有部分样品位于其他象限中，推测因为样品间平行误差导致，不影响整体结果；而酵解 800 倍液组（J800-1、2、3）



X: 各生长指标。下同。  
X: seedling growth index. Same for following figures.

图 3 上海青幼苗生长指标的 Biplot 图

Fig. 3 Biplot of bok choy seedling growth indices

表 5 酵解 400 倍铜藻液体肥与阳性对照对上海青幼苗生长的影响

Table 5 Effects of 400x dilution of fermented *S. horneri* liquid fertilizer and positive control on growth of bok choy seedlings

处理 Group	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	株鲜重 Fresh plant weight/g	根鲜重 Fresh root weight/g	株干重 Dry plant weight/g	根干重 Dry root weight/g	叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>
AC1	3.342±0.007 c	4.427±0.046 b	0.406±0.002 c	0.047±0.000 c	0.019±0.000 b	0.010±0.001 b	0.503±0.007 c
AC2	3.579±0.032 b	4.669±0.097 b	0.423±0.001 b	0.058±0.002 b	0.020±0.000 b	0.011±0.000 b	0.676±0.006 b
J400	5.517±0.006 a	5.411±0.063 a	0.613±0.002 a	0.141±0.002 a	0.032±0.000 a	0.026±0.000 a	1.525±0.011 a

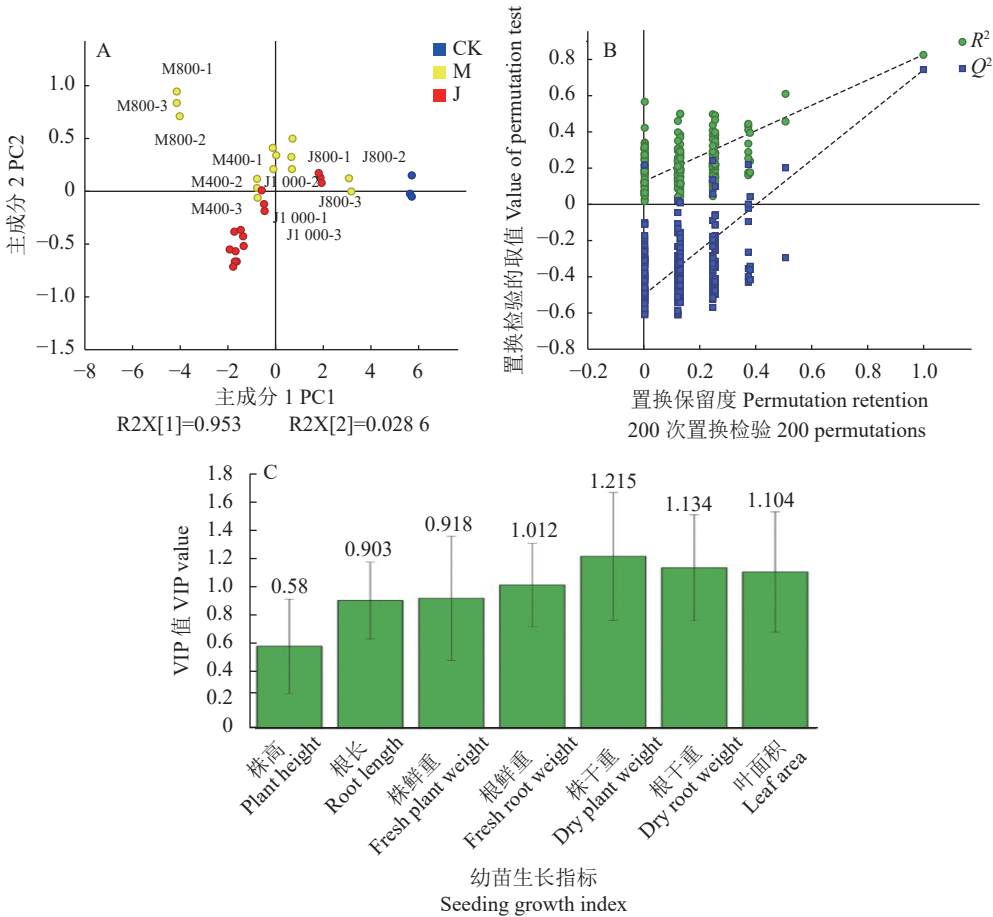


图 4 黄瓜幼苗生长指标的偏最小二乘法判别分析

Fig. 4 PLSDA on cucumber seedling growth indices

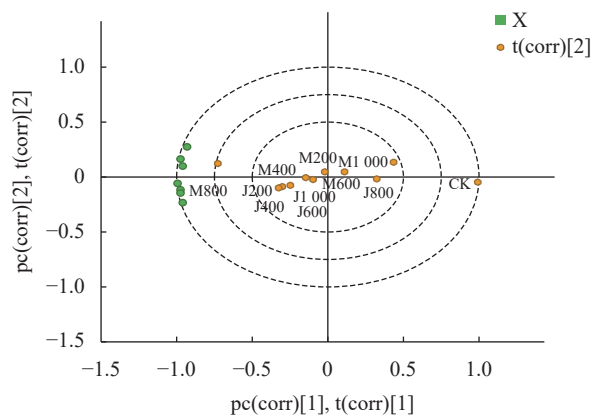


图 5 黄瓜幼苗生长指标的 Biplot 图  
Fig. 5 Biplot of cucumber seedling growth indices

果最好；图中清水组（CK）位于生长特征指标相反位置，可见清水组对幼苗生长促进作用最差，其他处理组大多位于中心原点附近，说明促生长效果适中。

将酶解 800 倍液进行阳性对照，结果如表 6 所示，酶解 800 倍液与 K 肥和对照海藻肥均达显著差异水平 ( $P<0.05$ )，地上指标（株高、株鲜重、株干重、叶面积）较对照海藻肥依次提高了 23%、15%、23%、25%，地下指标（根长、根鲜重、根干重）较对照海藻肥依次提高了 28%、15%、23%。

2.2.3 铜藻液体肥对番茄幼苗生长的影响 利用 Simca 14.1 构建番茄幼苗 PLS-DA 模型，结果如图 6-A

表 6 酶解 800 倍铜藻液体肥与阳性对照对黄瓜幼苗生长的影响  
Table 6 Effects of 800x dilution of enzymatically digested *S. horneri* liquid fertilizer and positive control on growth of cucumber seedlings

处理 Group	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	株鲜重 Fresh plant weight/g	根鲜重 Fresh root weight/g	株干重 Dry plant weight/g	根干重 Dry root weight/g	叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>
AC1	7.083±0.014 c	6.718±0.031 c	2.402±0.002 c	0.557±0.003 c	0.194±0.004 c	0.027±0.000 c	1.965±0.002 c
AC2	8.031±0.032 b	7.105±0.018 b	2.683±0.002 b	0.591±0.002 b	0.216±0.005 b	0.029±0.001 b	2.396±0.004 b
M800	9.860±0.024 a	9.095±0.015 a	3.077±0.004 a	0.681±0.001 a	0.266±0.002 a	0.036±0.001 a	2.998±0.004 a

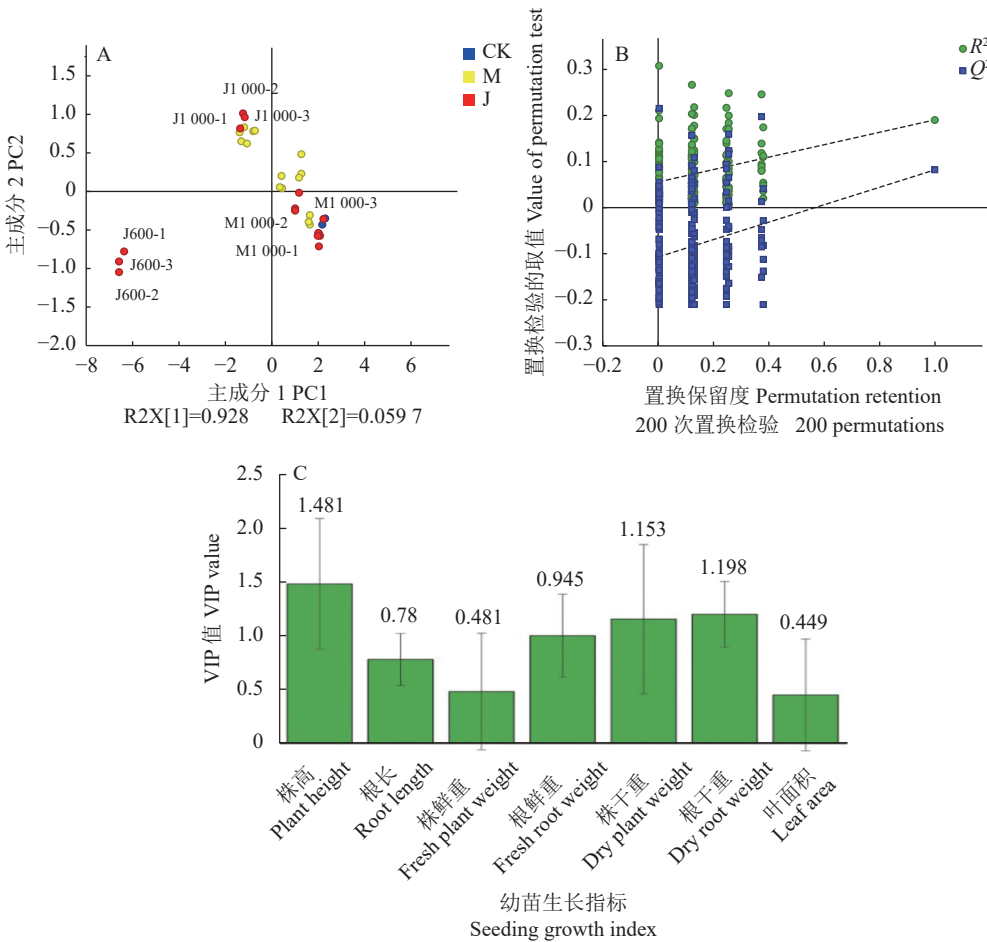


图 6 番茄幼苗生长指标的偏最小二乘法判别分析  
Fig. 6 PLSDA on tomato seedling growth indices



所示, 酵解组 (J) 与酶解组 (M) 有较好的分离趋势; 其中酵解 1000 倍液组 (J1000-1、2、3) 与酶解 1000 倍液组 (M1000-1、2、3) 分别位于第二和第四象限, 推测原因为 1000 倍稀释度下, 不同制备处理间的差异小于同一处理内与其他稀释度的差异。从得分图总体来看, 制备方式不同可对番茄幼苗生长产生不同影响, 酵解 600 倍液组 (J600-1、2、3) 单独位于第三象限, 为潜在最优组。进行 200 次置换检验验证模型是否过拟合, 如图 6-B 所示,  $R^2=0.0557$ ,  $Q^2=-0.107<0$ , 表明模型可靠, 无过拟合现象。生长指标的 VIP 图如图 6-C 所示, 可见株高、株干重、根干重为两组铜藻肥作用差异的主要测量指标。

通过 Simca 14.1 绘制番茄生长指标的 Biplot 图, 由图 7 可知, 酵解 600 倍液 (J600) 与一系列幼苗生长指标距离最近, 表明其促进番茄幼苗生长的效果最好; 图中其他处理组多位于中心原点附近, 说明对幼苗生长促进作用适中。

将酵解 600 倍液进行阳性对照, 结果如表 7 所

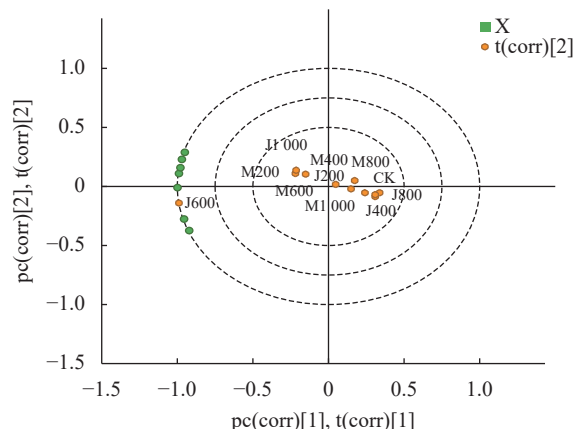


图 7 番茄幼苗生长指标的 Biplot 图

Fig. 7 Biplot of tomato seedling growth indices

示, 酵解 600 倍液与 K 肥和对照海藻肥均差异显著 ( $P<0.05$ ), 地上指标 (株高、株鲜重、株干重、叶面积) 较对照海藻肥依次提高了 8%、17%、31%、17%, 地下指标 (根长、根鲜重、根干重) 较对照海藻肥依次提高了 15%、28%、27%。

表 7 酵解 600 倍铜藻液体肥与阳性对照对番茄幼苗生长的影响

Table 7 Effects of 600x dilution of fermented *S. horneri* liquid fertilizer and positive control on growth of tomato seedlings

处理 Group	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	株鲜重 Fresh plant weight/g	根鲜重 Fresh root weight/g	株干重 Dry plant weight/g	根干重 Dry root weight/g	叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>
AC1	9.31±0.032 c	4.709±0.026 c	0.628±0.003 c	0.073±0.000 c	0.090±0.001 c	0.018±0.000 c	0.310±0.003 c
AC2	9.749±0.025 b	5.536±0.028 b	0.684±0.003 b	0.087±0.000 b	0.092±0.001 b	0.019±0.000 b	0.337±0.003 b
J600	10.486±0.021 a	6.367±0.030 a	0.799±0.001 a	0.112±0.001 a	0.121±0.000 a	0.024±0.000 a	0.395±0.000 a

### 3 讨论

#### 3.1 铜藻液体肥具备良好的肥效

海藻提取物中富含多种植物激素, 如细胞分裂素 (Cytokinin)、赤霉素 (Gibberellin) 等<sup>[21]</sup>, 能打破种子休眠, 提高种子的呼吸速率<sup>[22]</sup>, 从而促进种子萌发。同时铜藻液体肥含有多种矿物元素和植物生长调节剂<sup>[23]</sup>, 可提高植物的抗逆性<sup>[24]</sup>并激活生长潜力, 促进植物形成较大的根系。魏锋玉等<sup>[25]</sup>和 Zheng 等<sup>[26]</sup>均发现海藻提取物能极大刺激小白菜根系的生长, 与本研究结果一致。铜藻液体肥还能提升幼苗对营养物质的吸收和同化效率<sup>[27]</sup>, 在促进幼苗生根的基础上扩大吸收养分的表面积, 提高肥料利用率, 推动地下部分和地上部分的生长。

本研究结果表明铜藻液体肥能显著提高 3 种蔬菜种子的活力。酵解 200 倍、600 倍液对上海青种子萌发效果最好, 发芽指数较清水组均提高 12%, 对比市面上的对照海藻肥无显著差异 ( $P>0.05$ ); 酵

解 200 倍液对黄瓜种子萌发效果最优, 发芽指数较清水组提升 30%, 对比对照海藻肥提高了 7%; 酵解 1000 倍液对番茄种子萌发效果最佳, 发芽指数较清水组提升 14%, 对比对照海藻肥提高了 19%。本研究发现铜藻液体肥对 3 种蔬菜幼苗同样产生显著促生作用。多元统计分析结果显示, 酵解 400 倍液针对上海青幼苗生长促进作用最佳, 幼苗的根鲜重、根干重和叶面积增长效果显著 ( $P<0.05$ ), 较对照海藻肥分别提高了 144%、127%、126%; 酶解 800 倍液对黄瓜幼苗生长效果最佳, 其中根长和叶面积增长显著 ( $P<0.05$ ), 相较于对照海藻肥分别提高了 28% 和 25%; 酵解 600 倍液对番茄幼苗壮苗成效最好, 其中幼苗的株干重、根干重和根鲜重增长最为明显 ( $P<0.05$ ), 分别较对照海藻肥提高了 31%、27% 和 28%。

#### 3.2 铜藻液体肥对 3 种蔬菜品种产生不同肥效效应

铜藻液体肥虽能促进种子萌发和幼苗生长, 但

应用于不同作物时所发挥的生物学效应具有差异性。在种子萌发试验中,上海青种子的萌发情况普遍优于黄瓜和番茄,黄瓜种子次之。推测原因为不同作物种子的在萌发期间对养分需求不同,导致铜藻液体肥对3种作物种子的发芽率、发芽势和发芽指数产生了不同的影响效果。同时不同作物萌发生长所需的海藻肥稀释倍数不尽相同,有研究表明一些植物对海藻肥的浓度较为敏感,过高的添加量反而对植株的酶活以及生物量积累产生抑制<sup>[28-30]</sup>,过低则会使植株产量和品质的提高不够明显,因此针对不同品种的作物选择适宜的施用浓度十分重要。

### 3.3 不同制备方法铜藻液体肥具有不同肥效效应

酶法制备和发酵法制备将影响铜藻液体肥最终的作用肥效,本试验结果表明发酵法的制备效果普遍优于酶法制备。酶解法虽能破碎铜藻细胞壁,释放铜藻细胞的内容物<sup>[31]</sup>,但其中的大分子物质仍难以降解利用,而发酵法通过添加外源菌种对海藻肥进行发酵加工,利用菌种代谢产物使大分子物质充分降解。本研究中,种子萌发试验所筛选的3组最优铜藻液体肥均属于酵解组,其中上海青的最优酵解组(J200、J600)发芽指数较酶解最优组(M600)提高1.5%;黄瓜的最优酵解组(J200)较酶解最优组(M1000)发芽指数提升1.8%;在幼苗盆栽试验中,酶解组和酵解组在3种蔬菜幼苗生长指标的得分图中均出现不同程度的分离,表明两者肥效作用具有差异性。VIP图结果显示,发酵法与酶法的肥效差异主要体现在:(1)上海青幼苗的根长、根鲜重、根干重、株干重和叶面积。(2)黄瓜幼苗的根干重、株干重、根鲜重和叶面积。(3)番茄幼苗的株高、根干重和株干重。经Biplot图筛选发现发酵法应用于上海青和番茄幼苗的促生效果更好,最佳处理组均为发酵法制备,仅有黄瓜幼苗的最佳处理组属于酶法制备。考虑到酶法与发酵法降解铜藻产物的成分含量不同<sup>[32]</sup>,结合黄瓜种子萌发试验中,酶解组整体表现优于酵解组的情况,推测原因为黄瓜对海藻肥降解产物的利用偏好不同于上海青和番茄。

## 4 结论

发酵法制备的铜藻液体肥能大幅度促进3种蔬菜种子的萌发和幼苗的生长。本研究选用自筛的产海藻酸裂解酶菌种,可将低质铜藻转化为高质铜藻液体肥,在酶解的基础上提升铜藻液体肥的肥效。发酵法有着高效、环保等优势,但对于复合菌种的筛选、优化发酵菌种的产酶工艺以及应用于工业化生产等研究还有待进一步进行。

## 参考文献:

- [1] 秦雕,李聪,秦宇.中国海藻产业发展与应用现状[J].科技和产业,2021,21(3):104-110.  
QIN D, LI C, QIN Y. On the development and application status of seaweed industry in China [J]. *Science Technology and Industry*, 2021, 21 (3): 104-110. (in Chinese)
- [2] LIU F, LIU X F, WANG Y, et al. Insights on the *Sargassum horneri* golden tides in the Yellow Sea inferred from morphological and molecular data [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63 (4): 1762-1773.
- [3] 麻坤,刁钢.化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):1113-1120.  
MA K, DIAO G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (4): 1113-1120. (in Chinese)
- [4] SRIDHAR S, RENGASAMY R. Influence of Seaweed Liquid Fertilizer on Growth and Biochemical Characteristics of *Arachis hypogaea* L. under field trial [J]. *Journal of Ecobiotechnology*, 2011, 3 (12): 18-22.
- [5] 方同光,吴秋纫,李根深.用于促进植物生长的海藻提取液的生产方法,所得到的海藻提取液,及其复合肥料:CN1269339A[P].2000-10-11.
- [6] 周丽,高进华,解学仕,等.含腐植酸型海藻生物肥的研发及肥效评价[J].腐植酸,2021(5):30-35.  
ZHOU L, GAO J H, XIE X S, et al. Research and development of seaweed biofertilizer containing humic acid and its fertilizer effect evaluation [J]. *Humic Acid*, 2021 (5): 30-35. (in Chinese)
- [7] SIVASANKARI S, VENKATESALU V, ANANTHARAJ M, et al. Effect of seaweed extracts on the growth and biochemical constituents of *Vigna sinensis* [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97 (14): 1745-1751.
- [8] WAJAHATULLAH K, USHA P R, SOWMYALAKSHMI S, et al. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2009, 28 (4): 386-399.
- [9] ALMAROAI Y A, EISSA M A. Role of marine algae extracts in water stress resistance of onion under semiarid conditions [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20 (3): 1092-1101.
- [10] 管宇翔,韩西红,张琳,等.海藻肥对黄瓜抗旱性的影响及机理研究试验[J].种子科技,2020,38(21):3-5.  
GUAN Y X, HAN X H, ZHANG L, et al. Effect of seaweed fertilizer on drought resistance of cucumber and its mechanism [J]. *Seed Science & Technology*, 2020, 38 (21): 3-5. (in Chinese)
- [11] 孙晓,尹皓婵,张占田,等.海藻提取物对水稻产量及养分利用的影响[J].江苏农业科学,2020,48(16):100-103.  
SUN X, YIN H C, ZHANG Z T, et al. Influences of seaweed extracts on rice yield and nutrient utilization [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48 (16): 100-103. (in Chinese)
- [12] 付洋.海藻液体肥制备工艺研究及肥效初探[D].福州:福建师范大学,2018.  
FU Y. *Studies on the preparation technology and preliminary manurial efficiency of seaweed liquid fertilizer*[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018. (in Chinese)
- [13] 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.

- [14] 高紫云, 宋洪川, 郭嘉航, 等. 不同引发方式对甘遂种子萌发的影响 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41 (6): 44-50.  
GAO Z Y, SONG H C, GUO J H, et al. Effects of different initiation methods on seed germination of *Euphorbia kansui* [J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 41 (6): 44-50. (in Chinese)
- [15] 徐本美, 顾增辉. 种子活力的研究 [J]. 种子, 1989, 8 (5): 53-55.  
XU B M, GU Z H. Study on seed vigor [J]. *Seed*, 1989, 8 (5): 53-55. (in Chinese)
- [16] 袁华芳, 周刚. 雷力海藻肥在大棚番茄上的应用试验 [J]. 上海蔬菜, 2010 (3): 62.  
YUAN H F, ZHOU G. Application experiment of leili seaweed fertilizer on tomato in greenhouse [J]. *Shanghai Vegetables*, 2010 (3): 62. (in Chinese)
- [17] SINGH H P, BATISH D R, KOHLI R K. Autotoxicity: Concept, organisms, and ecological significance [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, 18 (6): 757-772.
- [18] 纪洪亭, 王勇, 曾燕楠, 等. 基于主成分分析评价不同类型肥料对向日葵穴盘苗素质的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (29): 100-106.
- [19] 施婷婷, 杨秀莲, 王良桂. 3个桂花品种花香组分动态特征及花被片结构解剖学观测 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44 (4): 12-20.  
SHI T T, YANG X L, WANG L G. Dynamic characteristics of floral components and anatomical observation of petals in three cultivars of *Osmanthus fragrans* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44 (4): 12-20. (in Chinese)
- [20] 高嘉宁, 张丹, 何海燕, 等. 基于正交偏最小二乘判别分析法分析滇重楼和华重楼品质成分差异性 [J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25 (1): 136-142.  
GAO J N, ZHANG D, HE H Y, et al. Difference in quality components of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* and *P. polyphylla* var. *chinensis* based on the orthogonal partial least squares discriminant analysis model [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2019, 25 (1): 136-142. (in Chinese)
- [21] 陈芊如, 褚德朋, Ilyas Naila, 等. 海藻提取物的农业应用研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (20): 49-56.  
CHEN Q R, CHU D P, NAILA I, et al. Research progress on agricultural application of seaweed extracts [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49 (20): 49-56. (in Chinese)
- [22] 马光恕, 廉华, 杨瑾, 等. 海藻糖对NaCl胁迫下番茄种子萌发的缓解效应 [J]. 北方园艺, 2010 (1): 38-40.  
MA G S, LIAN H, YANG J, et al. Mitigative effect of trehalose on NaCl stress of tomato seed germination [J]. *Northern Horticulture*, 2010 (1): 38-40. (in Chinese)
- [23] 汤洁. 海藻植物营养剂的开发利用现状和前景 [J]. 中国农技推广, 2011, 27 (6): 41-43.  
TANG J. Present situation and prospect of development and utilization of seaweed plant nutrients [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2011, 27 (6): 41-43. (in Chinese)
- [24] 王旭承, 王婷, 王梦娇, 等. 海藻肥对低温胁迫下铁皮石斛抗氧化能力及相关基因表达的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (1): 194-201.  
WANG X C, WANG T, WANG M J, et al. Effects of seaweed fertilizer on antioxidant capacity and related gene expression of *Dendrobium officinale* under low-temperature stress [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022 (1): 194-201. (in Chinese)
- [25] 魏锋玉, 李赞. 海藻浸提液对小白菜种子萌发的影响 [J]. 现代农业科技, 2011 (2): 124-125.  
WEI F Y, LI Y. Effect of seaweed extract on seed germination of Chinese cabbage [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011 (2): 124-125. (in Chinese)
- [26] ZHENG S Y, JIANG J, HE M L, et al. Effect of kelp waste extracts on the growth and development of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38683.
- [27] MUTALE-JOAN C, REDOUANE B, NAJIB E, et al. Screening of microalgae liquid extracts for their bio stimulant properties on plant growth, nutrient uptake and metabolite profile of *Solanum lycopersicum* L [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 2820.
- [28] 颜佳雯, 朱长俊, 王浩然, 等. 不同海藻肥栽培料对平菇酶活性的影响 [J]. 生物化工, 2021, 7 (3): 76-78,86.  
YAN J W, ZHU C J, WANG H R, et al. Study on enzyme activity of *pleurotostreatus* based on different seaweed fertilizers [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2021, 7 (3): 76-78,86. (in Chinese)
- [29] 何锐, 谭星, 高美芳, 等. 添加不同浓度海藻肥对水培芥蓝生长及品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (11): 2051-2059.  
HE R, TAN X, GAO M F, et al. Effects of different concentrations of seaweed extract on growth and quality of Chinese kale in hydroponics [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (11): 2051-2059. (in Chinese)
- [30] HERNÁNDEZ-HERRERA R M, SANTACRUZ-RUVALCABA F, RUIZ-LÓPEZ M A, et al. Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26 (1): 619-628.
- [31] 杨春妹, 杨锦, 崔丹丹, 等. 海带酶解和菌解工艺优化及其降解产物对菜心抗逆性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (8): 1432-1444.  
YANG C M, YANG J, CUI D D, et al. Optimization of parameters for enzymatic and bacterial hydrolysis of seaweeds and the effects of two products on the stress resistance of Chinese flowering cabbage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (8): 1432-1444. (in Chinese)
- [32] 金依静, 李蓝, 刘秋平, 等. 超声-复合酶解法提取海带中海藻酸钠的工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (5): 132-137.  
JIN Y J, LI L, LIU Q P, et al. Optimization of extraction process of sodium alginate from *Laminaria japonica* by ultrasonic-complex enzymatic hydrolysis method [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42 (5): 132-137. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)