doi：10.11838/sfsc.1673-6257.23667

基于主成分分析的 3 种微藻有机水溶肥料施用效果评价

高　飞[1]，王倩姿[2*]，朱娜娜[3]，韩　宝[4]，朱　文[4]

（1. 北京市耕地建设保护中心，北京　101101；2. 北京埃克兰德农业科技有限公司，北京　100081；3. 北京国农博创科技有限公司，北京　100081；4. 北京市房山区种植业技术推广站，北京　102400）

摘　要：为明确不同微藻有机水溶肥料对设施番茄生长、产量及品质的影响，通过主成分分析和综合评价得分，综合评价不同微藻有机水溶肥料的肥料效应，为番茄产量、品质综合评价提供分析方法和实现番茄高产、优质提供理论依据。选择了 3 种不同的微藻有机水溶肥料，通过 2 年的田间试验探索了不同微藻有机水溶肥料对番茄产量及品质的提升效果。试验结果表明：（1）施用微藻有机水溶肥料番茄的产量显著高于清水对照处理，在等量常规施肥的条件下，施用 3 种微藻有机水溶肥料（Competitor、Algafert、Levoamin）的处理单果重均显著增加，产量分别提高了 4.87、6.86、5.46 t/hm^2；（2）与常规施肥对照和清水对照相比，施用 3 种微藻有机水溶肥料的硝酸盐和有机酸含量显著降低，可溶性固形物和维生素 C 的含量显著增加；（3）从主成分综合得分分析，施用 Algafert 的处理得分最高，其次是 Levoamin，最低为 Competitor。综合考虑番茄的株高、茎粗、产量、品质等因素，番茄最佳施用效果的微藻有机水溶肥料为 Algafert。

关键词：番茄；微藻；产量；品质；主成分分析

番茄（*Lycopersicon esculentum* Mill.）属茄科番茄属一年生或多年生草本植物，是人们喜欢食用的蔬菜，也是我国主栽蔬菜作物，常年种植量在 5000 万 t 以上，占全国蔬菜总量的 7.1%[1]。随着生活条件的改善，设施番茄越来越受到消费者的喜爱。设施栽培高产出、高收入的特点也带来了高水肥资源的投入。过量施肥不仅会造成土壤盐渍化、酸化、土壤结构破坏、养分失衡、微生态环境改变等问题，还会显著降低番茄的植株生物量、产量、光合速率等[2-5]。杜连凤等[6]研究发现，氮肥的不合理施用大大增加了地下水硝酸盐污染的风险和造成了蔬菜硝酸盐含量的超标。李银坤等[7]研究也表明，过量施肥不仅不能显著提高设施黄瓜和番茄的产量，还会降低果实的产量和品质，而合理施肥不仅能够降低氮肥的气态损失，还能提高肥料的利用效率。因此，寻找新型的传统化肥替代品、进一步优化施肥结构、改进施肥技术、提高化肥利用效率及保护生态环境是现代农业亟待解决的重大问题。

目前，微藻已经成为新型强效有机水溶肥料制备的理想来源。微藻是一类光合利用度高的低等自养生物，种类繁多、分布广泛，具有固碳固氮能力强、生长速率快、生长周期短、可工业化养殖等特点[8]。微藻可以改善土壤的团粒结构，增强土壤的物理性能和减少土壤颗粒损失，提高土壤肥力，促进作物对营养物质的吸收和利用[9-10]。除此之外，微藻还可以改善土壤微生态环境，增加土壤微生物群落的结构和丰度[11]。刘淑芳等[12]用蛋白核小球藻、四尾栅藻和卷曲鱼腥藻液体肥对盆栽黄瓜灌根，发现施用微藻液体肥不仅促进了黄瓜的生长，也显著改善了土壤的质量。高立波等[13]研究发现，施用微藻微生物菌剂后，莴苣生物学性状指标、土壤养分含量显著增加，霜霉病、菌核病的发病率明显降低。本试验以设施番茄为材料，选取 3 种微藻有机水溶肥料，经主成分分析综合评价各处理的产量、果实品质，为番茄产量和品质并重的番茄施肥技术提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验连续开展两年（2022 年 4 月 4 日至 8 月 10 日和 2023 年 1 月 4 日至 5 月 16 日），试验田位于北京市房山区襄驸马庄村弘科农场（115° 58′ 21.4248″ E，39° 37′ 26.1264″ N，海拔 40 m）。试验

收稿日期：2023-10-31；**录用日期：**2024-01-26

作者简介：高飞（1972-），本科，高级农艺师，研究方向为肥料质量安全控制管理及土壤肥料检测技术。E-mail：2858138517@qq.com。

通讯作者：王倩姿，E-mail:1045234435@qq.com。

地土壤类型为壤土。耕层（0 ~ 20 cm）土壤基础指标如下：有机质 16.66 g/kg，全氮 1.21 g/kg，碱解氮 195.19 mg/kg，有效磷 184.78 mg/kg，速效钾 249.12 mg/kg，pH 值 7.87。

1.2　供试材料

1.2.1　供试作物

供试番茄品种为‘美味汇’。

1.2.2　供试肥料

牛粪（N 0.3%；P_2O_5 0.2%；K_2O 0.2%）、尿素（N 46%）、过磷酸钙（P_2O_5 18%）、复合肥料（18–9–18）。

供试微藻有机水溶肥料（Competitor）为西班牙微藻肥料公司的同类竞品，供试微藻有机水溶肥料（Algafert、Levoamin）均由西班牙博瑞森生物技术有限公司提供。对 3 种微藻有机水溶肥料进行化学检测和 52 种植物激素检测。主要检测结果见表 1。

表 1　供试微藻有机水溶肥料的样品检测结果

供试肥料	pH	有机质（g/L）	脱落酸（μg/mL）	L- 色氨酸（μg/mL）	吲哚 -3- 乙酸（μg/mL）	1- 氨基环丙烷羧酸（μg/mL）
Competitor	5.94	71.14	N/A	11.606	0.242	0.842
Levoamin	6.94	99.34	1.601	7.945	2.191	N/A
Algafert	6.65	65.32	N/A	17.651	0.074	1.676

注：N/A 表示该项目未检测出有效数值。

1.3　试验设计

第一茬试验于 2022 年 4 月 4 日移栽，8 月 10 日收获完成；第二茬试验于 2023 年 1 月 4 日移栽，5 月 16 日收获完成；间隔的时间为休耕时间。采用田间小区试验，设置 5 个处理：（1）常规施肥（CK0）；（2）常规施肥 + 清水（对照，CK）；（3）常规施肥 +Competitor；（4）常规施肥 +Algafert；（5）常规施肥 +Levoamin。小区按照随机区组设计，每个小区设置 3 次重复。小区的面积为 4 m × 5 m。小区内番茄采用双行宽窄行高垄定植，垄高 20 cm，大行距为 80 cm，小行距为 40 cm，株距为 35 cm。

试验各小区在移栽前统一施用牛粪 30000 kg/hm^2，其他肥料施用量见表 2。供试肥料均采用喷施（每次 3 L/hm^2，300 倍稀释）的方式施用，移栽 10 d 后，每 15 d 喷施一次，共喷施 4 次，其他肥料施用，田间灌溉以及病虫害防治等栽培措施保证一致。两茬试验肥料施用量相同。

表 2　不同处理的养分施用量

处理	N（kg/hm^2）	P_2O_5（kg/hm^2）	K_2O（kg/hm^2）	Competitor（L/hm^2）	Algafert（L/hm^2）	Levoamin（L/hm^2）
CK0	219.38	416.25	331.88	—	—	—
CK	219.38	416.25	331.88	—	—	—
Competitor	219.38	416.25	331.88	12	—	—
Algafert	219.38	416.25	331.88	—	12	—
Levoamin	219.38	416.25	331.88	—	—	12

1.4　测定指标与方法

1.4.1　生长指标

在定植后第 10、20、30、40、50 d 分别测定株高（用直尺测量从地面到生长顶端的距离）、茎粗（用游标卡尺测量第一节位上部 1 cm 处的横茎）。在果实成熟期及时采收各小区成熟的果实，统计整个收获期番茄产量并换算单位为 kg/hm^2。

1.4.2　品质指标

在番茄果实采收盛期，每个处理选取 3 个具有代表性且生长性状相似的果实测定品质。可溶性固形物采用 ATAGO PAL–3 数字手持糖量计测定；硝酸盐含量采用水杨酸比色法测定；采用钼蓝比色法测定维生素 C 含量[14]；采用氢氧化钠滴定法测定有机酸含量[15]。

1.5　数据处理

1.5.1　综合肥效评价方法

首先确定本研究产量及品质的主要影响因子，共 8 项指标，分别为株高、茎粗、产量、单果重及维生素 C、硝酸盐、可溶性固形物、有机酸含量。

对上述 8 项产量及品质的测定结果采用隶属度模型计算隶属度值，同时运用主成分分析法对指标进行降维，累积贡献率大于 85% 作为选择主成分的条件，并求得各指标的权重和载荷，以主成分因子负荷量值的正负来确定隶属度函数分布的升降获取主成分因子型[16]。最后计算各处理综合肥料效应（F），作为肥料施用效益的评价依据。

升型分布函数：$Q(x_i) = (x_{ij} - x_{imin}) / (x_{imax} - x_{imin})$（1）

降型分布函数：$Q(x_i) = (x_{imax} - x_{ij}) / (x_{imax} - x_{imin})$（2）

式中，$Q(x_i)$ 表示隶属度值；x_{ij} 表示各因子属性值；x_{imax} 表示第 i 项因子中因子属性最大值；x_{imin} 表示第 i 项因子中因子属性最小值。

运用 SPSS 20.0 进行主成分分析，并获取各评价因子在各主成分上的负荷量、方差贡献率和累积

方差贡献率[17]，进而确定各属性相应的权重：

$$\omega_i = c_i / \sum c_i \quad (3)$$

式中，ω_i 表示各属性的权重；c_i 表示第 i 项因子的因子负荷量。

根据模糊数学中的加乘法获得相应的肥料效果指数：

$$F = \sum_j^m K_j \left[\sum_{i=1}^n \omega_i Q(x_i) \right] \quad (4)$$

式中，$Q(x_i)$ 表示各肥料效应属性的隶属度值；ω_i 表示各肥料效应属性的权重向量；n 表示评价指标的个数；i 表示求和起始个数，i=1，2，…，n；m 表示所选主成分个数；K_j 表示第 j 个主成分的方差贡献率。

1.5.2　其他指标计算方法

采用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 进行数据处理和统计分析，多重比较采用邓肯法（Duncan，α=0.05）。

在经济效益计算中，按照番茄 6.0 元 /kg，过磷酸钙 1.8 元 /kg，复合肥（18-9-18）2.6 元 /kg，复合肥（15-5-35）3.5 元 /kg，供试微藻有机水溶肥料 Competitor、Algafert、Levoamin 分别为 150、150、120 元 /L 进行经济效益计算。

利润（元 /hm^2）= 产值（产量 × 单价）- 肥料成本

2　结果与分析

2.1　不同微藻有机水溶肥料对番茄植株生长指标的影响

株高和茎粗是影响番茄植株防倒伏能力和充分进行光合作用的重要指标[18]。如表 3 和表 4 所示，番茄的株高和茎粗均随着植株的生长发育逐渐增大。在常规施肥量相同的情况下，施用微藻有机水溶肥料可以增加番茄的株高和茎粗，尤其是在移栽 30 d 后施肥效果显著。与 CK0 和 CK 处理相比，2022 年结果表明，施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的株高明显提高，在 30、40 和 50 d 时差异显著（P<0.05，下同）。2023 年的结果显示，施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的株高均显著增加。对比施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的株高，发现在 10 和 20 d 时，株高表现为 Competitor>Levoamin>Algafert；而在 30、40 和 50 d 时，株高表现为 Algafert>Levoamin>Competitor。说明 Algafert 处理在番茄植株营养生长期的补偿生长明显。

表 3　施用微藻有机水溶肥料对番茄株高的影响　（cm）

年份	处理	定植后天数				
		10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
2022	CK0	16.99 ± 0.81a	30.83 ± 1.78ab	51.27 ± 1.95c	80.32 ± 1.18b	106.37 ± 0.84b
	CK	17.71 ± 1.05a	28.79 ± 1.26b	52.12 ± 0.99bc	80.77 ± 0.70b	107.27 ± 0.71b
	Competitor	18.75 ± 1.80a	32.64 ± 1.54a	56.36 ± 2.06a	85.22 ± 2.58a	109.79 ± 0.91a
	Algafert	17.61 ± 1.40a	30.62 ± 1.09ab	56.86 ± 0.87a	86.12 ± 0.60a	110.27 ± 0.12a
	Levoamin	17.82 ± 1.25a	32.03 ± 0.89a	54.58 ± 1.09ab	84.73 ± 1.51a	109.90 ± 0.35a
2023	CK0	16.70 ± 0.35b	28.60 ± 0.10b	48.83 ± 0.31c	79.03 ± 1.07b	105.80 ± 0.36c
	CK	16.47 ± 0.25b	28.43 ± 0.15b	39.30 ± 0.10c	80.50 ± 0.66b	105.43 ± 0.80c
	Competitor	18.17 ± 0.23a	33.37 ± 0.68a	55.93 ± 0.42b	84.70 ± 1.35a	109.03 ± 0.47b
	Algafert	17.97 ± 0.40a	32.77 ± 0.71a	58.10 ± 0.44a	85.05 ± 0.65a	110.03 ± 0.21a
	Levoamin	18.03 ± 0.21a	32.90 ± 0.44a	57.53 ± 0.78a	84.93 ± 0.65a	109.38 ± 0.20ab

注：不同小写字母表示不同施肥处理差异显著（P<0.05）。下同。

表 4　施用微藻有机水溶肥料对番茄茎粗的影响　（mm）

年份	处理	定植后天数				
		10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
2022	CK0	4.72 ± 0.13a	6.48 ± 0.50a	8.28 ± 0.40a	11.23 ± 0.79a	11.57 ± 0.28a
	CK	5.06 ± 0.20a	6.41 ± 0.31a	8.16 ± 0.54a	11.17 ± 0.85a	11.53 ± 0.18a
	Competitor	5.00 ± 0.33a	6.72 ± 0.32a	8.84 ± 0.44a	12.27 ± 0.40a	12.33 ± 0.41a
	Algafert	5.28 ± 0.38a	7.27 ± 0.66a	8.66 ± 0.37a	12.48 ± 0.85a	12.82 ± 0.20a
	Levoamin	5.28 ± 0.79a	6.74 ± 0.40a	8.57 ± 0.24a	12.38 ± 0.70a	12.69 ± 0.38a
2023	CK0	4.57 ± 0.25bc	6.43 ± 0.12c	8.28 ± 0.11b	11.53 ± 0.25b	11.60 ± 0.10b
	CK	4.53 ± 0.06c	6.40 ± 0.17c	8.24 ± 0.16b	11.50 ± 0.36b	11.53 ± 0.35b
	Competitor	4.83 ± 0.12ab	8.37 ± 0.12b	8.67 ± 0.25ab	12.60 ± 0.10a	12.63 ± 0.23a
	Algafert	4.93 ± 0.15a	8.47 ± 0.12ab	8.73 ± 0.30a	12.60 ± 0.17a	12.70 ± 0.20a
	Levoamin	4.97 ± 0.12a	8.63 ± 0.15a	8.77 ± 0.28a	12.63 ± 0.21a	12.77 ± 0.15a

各处理的番茄茎粗在苗期和开花期迅速增加，进入结果期后不再增加。2023 年的结果显示，施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的茎粗均显著增加。对比施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的茎粗，发现在 5 个时期番茄的茎粗均表现为 Levoamin>Algafert>Competitor。

2.2　不同微藻有机水溶肥料对番茄产量及经济效益的影响

由表 5 可知，连续 2 茬施用微藻有机水溶肥料后，与 CK 处理相比，施用 3 种微藻有机水溶肥料（Competitor、Algafert、Levoamin）的处理单果重均显著增加，产量分别提高了 4.87、6.86 和 5.46 t/hm^2。与常规施肥处理（CK0）相比，施用 3 种微藻有机水溶肥料（Competitor、Algafert、Levoamin）处理的产量分别提高了 4.79、6.78 和 5.38 t/hm^2。由此可见，在常规施肥的基础上施用微藻有机水溶肥料可以提高番茄的单果重和产量。对比 3 种微藻有机水溶肥料处理的结果发现，Algafert 的产量和单果重显著高于 Competitor 和 Levoamin 处理，说明 Algafert 更有利于番茄产量的累积。

表 5　施用微藻有机水溶肥料对番茄产量及经济效益的影响

年份	处理	单果重（g）	产量（t/hm^2）	产值（万元 / hm^2）	肥料成本（万元 / hm^2）	肥料效益（万元 / hm^2）
2022	CK0	85.07 ± 0.21d	28.01 ± 0.03c	16.80	0.42	16.38
	CK	86.90 ± 0.82c	28.14 ± 0.06c	16.88	0.42	16.46
	Competitor	92.33 ± 0.55b	31.52 ± 0.24b	18.91	0.60	18.31
	Algafert	91.13 ± 0.65b	31.57 ± 0.27b	18.94	0.60	18.34
	Levoamin	93.77 ± 1.18a	32.29 ± 0.16a	19.38	0.56	18.82
2023	CK0	83.30 ± 0.36c	28.32 ± 0.10d	16.99	0.42	16.57
	CK	82.37 ± 0.68c	28.24 ± 0.15d	16.94	0.42	16.52
	Competitor	90.83 ± 0.45b	33.11 ± 0.14c	19.87	0.60	19.27
	Algafert	93.70 ± 1.01a	35.10 ± 0.17a	21.06	0.60	20.46
	Levoamin	91.10 ± 0.17b	33.70 ± 0.12b	20.22	0.56	19.66

2.3　不同微藻有机水溶肥料对番茄品质指标的影响

由表 6 可见，与 CK0 和 CK 处理相比，施用 3 种微藻有机水溶肥料（Competitor、Algafert、Levoamin）处理的硝酸盐和有机酸的含量显著降低，可溶性固形物和维生素 C 的含量显著增加。由此可见，施用微藻有机水溶肥料可以显著改善番茄果实的品质。对比 3 种微藻有机水溶肥料可知，Algafert 的可溶性固形物含量和有机酸含量显著高于 Competitor，可以在一定程度上解决番茄甜度过高而酸度低的问题。因此 Algafert 可以显著提高番茄的品质，增加番茄酸甜口感风味，有利于高品质、高营养、低风险的番茄种植生产。

表 6　施用微藻有机水溶肥料对番茄品质的影响

年份	处理	硝酸盐（mg/kg）	可溶性固形物（%）	维生素 C（mg/100 g）	有机酸（%）
2022	CK0	27.58 ± 0.37a	5.70 ± 0.26b	12.80 ± 0.30c	0.79 ± 0.04a
	CK	27.15 ± 0.23a	5.60 ± 0.20b	13.35 ± 0.22bc	0.79 ± 0.03a
	Competitor	23.30 ± 0.15c	6.00 ± 0.20ab	13.41 ± 0.44b	0.71 ± 0.02b
	Algafert	23.96 ± 0.27b	6.23 ± 0.15a	14.43 ± 0.20a	0.74 ± 0.03ab
	Levoamin	24.03 ± 0.62b	6.00 ± 0.35ab	13.49 ± 0.28b	0.73 ± 0.01b
2023	CK0	26.55 ± 0.23a	6.10 ± 0.10c	12.60 ± 0.16b	0.80 ± 0.02a
	CK	26.42 ± 0.13a	6.17 ± 0.15c	12.59 ± 0.27b	0.80 ± 0.03a
	Competitor	22.44 ± 0.26b	6.60 ± 0.10b	13.32 ± 0.09a	0.68 ± 0.03c
	Algafert	21.21 ± 0.13c	6.93 ± 0.15a	13.61 ± 0.16a	0.74 ± 0.02b
	Levoamin	21.41 ± 0.28c	6.70 ± 0.20ab	13.43 ± 0.17a	0.72 ± 0.02bc

2.4　不同微藻有机水溶肥料对番茄产量和品质综合评价

番茄产量和品质之间在一定程度上相互关联，但又无法彼此代替，所以本研究采用主成分分析法，利用 SPSS 20.0 进行主成分分析，结果见表 7。前 2 个主成分的累计方差贡献率为 85.212%。即前 2 个主成分所含信息占总信息量的 85.212%，且 2 个主成分的特征值均大于 1，表明可以用于不同微藻有机水溶肥料效果综合评价。

表 7　主成分的特征根、方差贡献率、负荷量和权重

指标	成分			
	第一主成分		第二主成分	
	负荷量	权重	负荷量	权重
株高	0.936	0.163	0.233	0.123
茎粗	0.910	0.158	0.032	0.017
产量	0.551	0.096	0.595	0.314
单果重	0.927	0.161	0.336	0.177
维生素 C	0.652	0.114	0.641	0.338
硝酸盐	0.798	0.139	0.006	0.003
可溶性固形物	0.959	0.167	0.224	0.118
有机酸	0.936	0.163	0.166	0.088
特征根	6.604		1.065	
方差贡献率（%）	73.375		11.837	
累计方差贡献率（%）	73.375		85.212	

根据各指标的隶属度及各因子的权重结果计算不同微藻有机水溶肥料的综合肥料效应 *F* 值（表 8），结果表明，Algafert>Levoamin>Competitor>CK>CK0。说明，在常规施肥的基础上，施用微藻有机水溶肥料对番茄产量和品质的综合施用效应有较明显的影响，其中 Algafert 应用效果最好，Levoamin 次之，Competitor 最次。

表 8　不同微藻有机水溶肥料的肥料效应综合得分

处理	CK0	CK	Competitor	Algafert	Levoamin
F 值	40.69	41.05	44.01	64.66	54.86
排名	5	4	3	1	2

3　讨论

3.1　不同微藻有机水溶肥料对番茄生长及产量的影响

对 3 种微藻有机水溶肥料进行植物激素测定，发现 3 种微藻有机水溶肥料主要包含脱落酸、L-色氨酸、吲哚 -3- 乙酸和 1- 氨基环丙烷羧酸，测定结果见表 1。微藻有机水溶肥料可以调节植物体内活性生长素的含量。这些活性生长素直接参与控制植物体内的许多生长发育过程，例如根的生长，顶端优势、维管组织的形成，在组织培养中与细胞分裂素共同调控细胞分裂及不同器官的分化等[19-20]。刘淑芳等[12]研究发现，施用微藻促进盆栽黄瓜开花和营养生长。Uysal 等[21]研究表明，施用微藻提高了玉米和小麦的发芽率及株高。本试验结果表明，施用微藻有机水溶肥料可以显著提高番茄的株高和茎粗，尤其 Algafert 在 30、40 和 50 d 表现突出。这可能与 Algafert 中 1- 氨基环丙烷羧酸和色氨酸的含量较高有关，一方面刺激番茄苗期根系的生长，为后期作物植株的发育提供了足够的养分；另一方面增加了番茄叶肉细胞内叶绿素数量和每个叶肉体内基粒数，有效增强了光合效率[22]。

在作物生长期间投入适量的微藻可在一定程度上提高作物产量[23]。微藻有机水溶肥料的施用不仅可以提供外援生长素，还能补充作物需要的营养元素，为作物增产提供基础。果实膨大细胞代谢过程中，适量的活性生长素和营养元素是果实健康优质生长的必要条件[24]。本研究结果表明，相较于 CK 处理，施用 3 种微藻有机水溶肥料处理的单果重和产量均显著提高。Moniem 等[25]在葡萄叶面喷施绿藻细胞提取物，葡萄产量和浆果品质均达到最大经济效益。庞媚等[26]通过在设施甜瓜基施传统有机肥的基础上，于苗期追施 1 次微藻营养液甜瓜产量较对照（不施）显著增加 14.3%。

3.2　不同微藻有机水溶肥料对番茄品质的影响

番茄果实的硝酸盐、可溶性固形物、维生素 C、有机酸等是评价番茄果实内在品质的重要指标，其含量决定了番茄的营养价值和口感风味，进而影响农民的收益[27-28]。微藻有机水溶肥料在作物生产中可以改善果实的品质，是因为一方面微藻分泌合成多种活性物质（多糖、脱落酸、生长素等），可以调节作物的代谢活动，促进作物对矿物质元素的吸收和利用[29]；另一方面，有机水溶肥料中富含有机质，可以改善土壤化学性状，促进微生物活动，为作物提供了较好的生长发育环境。本研究表明，施用微藻有机水溶肥料可以提高番茄果实的可溶性固形物和维生素 C 含量，降低番茄果实的硝酸盐和有机酸的含量。这与臧小平等[30]和司若彤等[31]的研究结果一致。张蕊等[32]研究结果也表明，施用海藻有机肥桃子的果实品质在总糖、葡萄糖和蔗糖含量方面比对照水分别提高了 29.17%、16.52% 和 48.3%。对比 3 种微藻有机水溶肥料的番茄果实品质可知，Algafert 处理的可溶性固形物最高。分析其原因可知，Algafert 的色氨酸含量较高，色氨酸可以调控番茄不同生育时期果实糖类的积累，尤其对促进幼果的蔗糖输入和转化作用显著。

由于原始指标测定计量单位不同，对肥效效应评价指标的正负影响等原因，本研究无法直观地对各种微藻有机水溶肥料的肥料效应做出优劣比较，因此，利用主成分分析对各个指标进行综合评分，综合不同微藻有机水溶肥料处理的番茄产量、株高、茎粗、可溶性固形物、有机酸、维生素 C，得到肥料效应综合得分。施用微藻有机水溶肥料的综合肥料效应得分均高于对照处理，其中以西班牙博瑞森生物技术有限公司 Algafert 得分最高，肥料效应最佳。

4　结论

施用微藻有机水溶肥料不仅可以促进番茄植株的株高和茎粗的增加，还可以改善番茄品质指标。经主成分分析综合评价可以看出，施用微藻有机水溶肥料可以明显综合改善番茄的产量和品质，其中西班牙博瑞森生物技术有限公司 Algafert 得分最高，肥料效应最佳，Levoamin 次之。

参考文献：

[1] 马兆红．从生产市场需求谈我国番茄品种的变化趋势［J］．中国蔬菜，2017（3）：1-5.

[2] 朱隆静，喻景权．不同供磷水平对番茄生长和光合作用的影响［J］．浙江农业学报，2005（3）：120-122.

[3] 吴一群，张丽娜，郑丽敏，等．高磷对番茄幼苗光合作用的影响［J］．热带作物学报，2009，30（6）：756-760.

[4] 韩雪，曲梅，李银坤，等．不同施肥水平对温室番茄生长、氮吸收及产量品质的影响［J］．中国土壤与肥料，2021(2)：162-169.

[5] 王光飞，廖开志，马艳，等．中药渣有机肥耦合高效水溶肥改良不同肥力设施番茄土壤效果［J］．中国土壤与肥料，2021（5）：103-111.

[6] 杜连凤，赵同科，张成军，等．京郊地区3种典型农田系统硝酸盐污染现状调查［J］．中国农业科学，2009，42（8）：2837-2843.

[7] 李银坤，武雪萍，武其甫，等．水氮用量对设施栽培蔬菜地土壤氨挥发损失的影响［J］．植物营养与肥料学报，2016，22（4）：949-957.

[8] 张靖洁，刘珅坤，唐涛，等．微藻源生物刺激剂的制备及在设施农业中的应用［J］．生物技术通报，2020，36（4）：164.

[9] 余劲聪．海藻寡糖在农业领域的应用研究进展［J］．南方农业学报，2016，47（6）：921-927.

[10] Bryant H L，Gogichaishvili I，Anderson D，et al．The value of post extracted algae residue［J］．Algal Research，2012，1(2)：185-193.

[11] 张靖洁．微藻生物肥改善土壤肥力及根际菌群和提高小油菜产量品质效应的研究［D］．太原：山西农业大学，2020.

[12] 刘淑芳，吕俊平，冯佳，等．施用微藻对黄瓜生长及土壤质量的影响［J］．山西农业科学，2016，44（9）：1312-1315.

[13] 高立波，梁群，管欢，等．微藻微生物菌剂在莴苣生产上的效果试验［J］．中国果菜，2021，41（7）：74-77.

[14] 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，2000.

[15] 李小方，张志良．植物生理学实验指导［M］．5版．北京：高等教育出版社，2016.

[16] 张新星．不同种植年限山药田土壤肥力时空变化特征研究［D］．保定：河北农业大学，2017.

[17] 赵娜，孟平，张劲松，等．华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价［J］．应用生态学报，2014，25（2）：351-358.

[18] 马业辉，洪明，马晓鹏，等．施钾量对和田日光温室番茄生长、产量及品质的影响［J］．中国土壤与肥料，2021（6）：220-226.

[19] 王泽文．海藻植物生长调节剂的检测及促生长作用研究［D］．青岛：中国海洋大学，2010.

[20] 钟晓红．色氨酸对草莓离体培养与生长发育的调控机理研究［D］．长沙：湖南农业大学，2004.

[21] Uysal F，Ozge U，Kamil E．Evaluation of microalgae as microbial fertilizer［J］．European Journal of Sustainable，2015，4（2）：77-82.

[22] 蔡永旺，张英华，周顺利，等．利用乙烯利塑造夏玉米凹形冠层对产量及其相关性状的影响［J］．玉米科学，2010，18（3）：90-94，97.

[23] 边建文，崔岩，杨宋琪，等．微藻生物肥料的农业应用研究进展［J］．中国土壤与肥料，2020（5）：1-9.

[24] 林建明，林电，许杰．不同氮钾配比对芒果产量与品质的影响［J］．广东农业科学，2012，39（10）：92-93.

[25] Moniem E A A E，Abd-Allah A S E．Effect of green alga cells extract as foliar spray on vegetative growth，yield and berries quality of superior grapevines［J］．Agricultural Environmental Science，2008，4（4）：427-433.

[26] 庞媚，欧小青，包雪冰，等．几种新型肥料对设施甜瓜产量及品质的影响［J］．中国果菜，2020，40（8）：66-69.

[27] 石胜友，武红霞，王松标，等．杧果种质果实品质性状多样性分析［J］．园艺学报，2011，38（5）：840-848.

[28] 来源，同延安，陈黎岭，等．施肥对猕猴桃产量和品质的影响［J］．西北农林科技大学学报（自然科学版），2011，39（10）：171-176.

[29] Elarroussia H，Elmernissia N，Benhimaa R，et al．Microalgae polysaccharides a promising plant growth biostimulant［J］．Algal Biomass，2016，7（4），55-63.

[30] 臧小平，周兆禧，林兴娥，等．不同用量有机肥对芒果果实品质及土壤肥力的影响［J］．中国土壤与肥料，2016（1）：98-101.

[31] 司若彤，刘维，林电．有机肥部分替代化肥对台农芒果产量和品质的影响［J］．中国土壤与肥料，2020（4）：107-114.

[32] 张蕊，王钰馨，赵雪惠，等．海藻有机肥不同施用量对土壤肥力及肥城桃品质的影响［J］．植物生理学报，2016，52（12）：1819-1828.

Quality evaluation of the application effect of three microalgae organic water-soluble fertilizers based on principal component analysis

GAO Fei[1]，WANG Qian-zi[2*]，ZHU Na-na[3]，HAN Bao[4]，ZHU Wen[4]（1. Beijing Farmland Construction Protection Center，Beijing 101101；2. Beijing Acreland Agro-Technology Co.，Ltd，Beijing 100081；3. Beijing Agri-Innov Technology Co.，Ltd，Beijing 100081；4. Planting Technology Extension Station of Fangshan District，Beijing 102400）

Abstract： The objective was to investigate the effects of different microalgae organic fertilizers on the growth，yield and quality of tomato. Through the principal components analysis and evaluation scores of effects of different micro algae organic water-soluble fertilizers，an analytical method and theoretical basis were provided to evaluate the quality and achieve high

yield and quality. Three microalgae organic water-soluble fertilizers were selected, and explored the improvement effect of different microalgae organic water-soluble fertilizers on tomato yield and quality through a 2-year of field experiment. The results showed that: (1) The yield of tomato treated with microalgae organic water-soluble fertilizer was significantly higher than that of the water control treatment. Under the same amount of conventional fertilization conditions, the single fruit weight of the treatment treated with three types of microalgae organic water-soluble fertilizers (Competitor, Algafert, Levoamin) was significantly increased, and the yield was increased by 4.87, 6.86, 5.46 t/hm^2, respectively. (2) Compared with conventional fertilization control and clear water control, the nitrate and organic acid content of the three microalgae organic water-soluble fertilizers were significantly decreased, while the content of soluble solids and vitamin C were significantly increased. (3) From the analysis of principal component comprehensive scores, the treatment using Algafert scored the highest, followed by Levoamin and Competitor. Taking into account factors such as plant height, stem diameter, yield and quality of tomatoes, the microalgae organic water–soluble with the best application effect on tomatoes was Algafert.

Key words: tomato; micro algae; yield; quality; principal component analysis