

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.202423.0738

# 小球藻粉对番茄幼苗生长及土壤性质的影响

陈平<sup>1</sup>, 张紫然<sup>1</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 张智涵<sup>1,2</sup>, 吕晓艳<sup>3</sup>, 赵吉强<sup>1</sup>, 汪少丽<sup>2</sup>, 刘保友<sup>1,2</sup>(1. 烟台大学生命科学学院 山东烟台 264005; 2. 山东省烟台市农业科学研究院 山东烟台 265500;  
3. 山东省烟台市中国社科院农村发展研究中心 山东烟台 265499)

**摘要:** 为研究小球藻粉作为生物肥料的潜能, 以番茄品种红粉佳人为材料, 设置叶喷和灌根两种施用方式, 探究施用不同浓度的小球藻粉对番茄幼苗生长指标及土壤性质的影响。结果表明, 与清水对照相比, 小球藻粉 500 倍稀释液对番茄生长效果最佳, 叶喷和灌根处理后株高、叶片数、生物量和生长函数显著增加 2.90%~47.49%, 灌根处理效果整体优于叶喷处理; 与生物肥料“益施帮”和复合肥“大量元素水溶肥料”相比, 小球藻粉 500 倍液同样表现出生物量和生长函数的显著增加。在改善土壤性质方面, 小球藻粉 500 倍叶喷和灌根处理后土壤 pH 分别降低 0.06、0.29, 电导率显著降低 8.31% 以上; 小球藻粉灌根处理番茄后植株地上、地下部位以及土壤中氮素含量增加; 小球藻粉叶喷及灌根处理后土壤中蔗糖酶、硝酸还原酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶等酶活性显著提高。研究结果证实小球藻粉叶喷及灌根均适用于番茄生长发育及土壤改良, 可为小球藻粉及其他生物肥料的开发应用提供试验依据。

**关键词:** 番茄; 小球藻; 幼苗生长; 土壤性质

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)06-135-07

## Effects of *Chlorella vulgaris* powder on tomato seedling growth and soil properties

CHEN Ping<sup>1</sup>, ZHANG Ziran<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhihan<sup>1,2</sup>, LÜ Xiaoyan<sup>3</sup>, ZHAO Jiqiang<sup>1</sup>, WANG Shaoli<sup>2</sup>, LIU Baoyou<sup>1,2</sup>

(1. College of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China; 2. Yantai Academy of Agricultural Sciences, Yantai 265500, Shandong, China; 3. Rural Development Research Center of Chinese Academy of Social Sciences, Yantai City, Shandong Province, Yantai 265499, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the potential of *Chlorella vulgaris* powder as a biological fertilizer, the experiment used tomato variety Hongfenjiaren as the material, and set up two application methods of leaf spray and root irrigation to explore the effects of different concentrations of *C. vulgaris* powder on tomato seedling growth index and soil properties. The results showed that compared with the water control, the 500 times dilution of *C. vulgaris* powder had the best effect on the growth of tomato. After leaf spray and root irrigation, the plant height, leaf number, biomass and growth function were significantly increased by 2.90%-47.49%, and the effect of root irrigation was better than that of leaf spray. Compared with the biological fertilizer Yishibang and the compound fertilizer Macroelement Water Soluble Fertilizer, the 500 times dilution of *C. vulgaris* powder also showed a significant increase in biomass and growth function. In terms of improving soil properties, the pH of soil decreased by 0.06 and 0.29, respectively, and the electrical conductivity decreased significantly by more than 8.31% after spray and root irrigation with 500 times dilution of *C. vulgaris* powder. The content of nitrogen in the aboveground and underground parts of the plant and the soil increased after application with *C. vulgaris* powder. The activities of sucrase, nitrate reductase, catalase, urease, polyphenol oxidase, peroxidase in soil increased significantly

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 山东省农业产业技术体系(SDAIT-06-11); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2023TSGC0894, 2023TSGC0829); 山东省重点研发计划(2021CXGC010602, 2021CXGC010802, 2022CXGC020709); 烟台市科技计划项目(2021NYNC015, 2022XCZX094, 2023ZDCX026); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KC026); 农业农村部农作物病虫害疫情监测与防治项目(152307026)

作者简介: 陈平, 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物病害防治及机理研究。E-mail: chenping@s.ytu.edu.cn

共同第一作者: 张紫然, 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物病害防治及机理研究。E-mail: zhangziran@s.ytu.edu.cn

通信作者: 汪少丽, 女, 高级农艺师, 主要从事植物病害防治及机理研究。E-mail: shaoliwang123@126.com

刘保友, 男, 正高级农艺师, 主要从事植保与资环新技术研发与推广工作。E-mail: baoyou1022@163.com

after *C. vulgaris* powder leaf spray and root irrigation. The results of this study confirmed that *C. vulgaris* powder leaf spray and root irrigation were suitable for tomato growth and soil improvement, which could provide experimental basis for the development and application of *C. vulgaris* powder and other biological fertilizers.

**Key words:** Tomato; *Chlorella vulgaris*; Seedling growth; Soil properties

在我国农业生产中,化肥施用量逐年增加,衍生出土壤板结、酸化、盐碱等问题<sup>[1]</sup>。国务院在推进农业供给侧结构性改革中,对减少化肥农药的施用量和改善生态环境提出了明确要求<sup>[2]</sup>。生物肥可提高土壤肥力水平、改善土壤理化性质和微生物系统、活化土壤养分、增强土壤向作物提供营养的能力,从而提高作物产量和品质、增强作物抗性、减少病虫害发生<sup>[3-4]</sup>。生物肥以绿色环保可持续发展等优势有望成为传统化学肥料的替代者<sup>[5]</sup>。

微藻含有丰富的生长活性物质,如植物激素、多糖、氨基酸、微量元素等,在调节生长、发育和对刺激反应中起重要作用<sup>[6-7]</sup>。微藻代谢产物和植物激素具有潜在的农业用途,代谢物中的酚类化合物、萜类化合物、游离脂肪酸等已被鉴定为植物生长促进剂<sup>[8-9]</sup>。小球藻(*Chlorella vulgaris*)归属小球藻科,为单细胞微藻,不能够形成合子,只能通过无性繁殖,每个细胞可以产生2、4、8或16个似亲孢子,成熟后母细胞破裂,孢子逸出,长大后即为新个体<sup>[10-11]</sup>。20多亿年前,小球藻出现在地球上,分布范围极广,可在极端的环境中生存,不仅能利用光能自养,还能在异养条件下利用有机碳源进行生长和繁殖<sup>[12]</sup>。小球藻含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂类、脂肪酸、维生素、类胡萝卜素等营养成分,在饲料、食品、医药、生物柴油等领域都有重要作用<sup>[13]</sup>。

近年来,国内外研究人员对小球藻在农业领域

的应用方面进行相关研究。Dineshkumar等<sup>[14]</sup>研究表明,小球藻和牛粪混合可促进玉米的生长,提高产量;Kholssi等<sup>[15]</sup>研究表明,小球藻悬浮液对提高小麦地上和地下部分的生物量起促进作用,明确藻液中的藻类分泌的营养物质和胞外物质影响植物的生长;Faheed等<sup>[16]</sup>指出施用小球藻作为土壤添加剂可提高莴苣的产量、品质和生产力,减少环境污染;刘淑芳等<sup>[17]</sup>研究表明,施用小球藻液体肥可促进黄瓜生长,提高土壤质量。

目前小球藻的研究多集中在藻类提取液或与牲畜粪便、秸秆等生物有机质的混配方面,制作复杂、成本高且不宜保存,而利用小球藻制得的小球藻粉,可克服上述缺点。笔者通过探究小球藻粉不同施用方式及浓度对番茄苗期生长指标和土壤性质的影响,明确其作为生物肥料的作用机制,以期小球藻粉将来在农业方面的广泛应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2023年3—7月在山东省烟台市福山区烟台农业科学院试验地进行,地处中国山东半岛东北部,属暖温带季风气候。选取日光温室中段栽培区域作为试验小区,每小区面积8.00 m<sup>2</sup>,栽培株行距0.45 m×0.75 m。土壤为棕壤,肥力均匀,排灌条件良好。试验前0~20 cm土层土壤基本理化性质见表1。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

指标 Index	w(铵态氮) Ammonium nitrogen content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有效磷) Available phosphorus content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(速效钾) Rapidly available potassium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有机质) Organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH
数值 Value	39.21	9.74	42.16	139.56	22.67	6.83

### 1.2 供试材料

试验用番茄品种红粉佳人是常规大果番茄,为沧州津科力丰种苗有限责任公司产品。

供试肥料:小球藻粉为小球藻粗提物,其中粗蛋白含量(w,后同)≥45%,叶绿素含量≥6.5 mg·g<sup>-1</sup>,为烟台泓源生物肥料有限公司产品;益施帮是一种天然源的生物激活剂,其中氨基酸含量(ρ,后同)≥110 g·L<sup>-1</sup>,(Mn+Zn)含量≥24 g·L<sup>-1</sup>,富含脯氨

酸、羟基脯氨酸等平衡及抗逆因子,为先正达集团股份有限公司产品;大量元素水溶肥料是本试验灌根复合肥,剂型为粉剂,其中(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)含量≥51%,Mg含量≥0.9%,(Zn+B)含量≥0.1%,为雅苾国际有限公司产品。

### 1.3 试验设计

试验采取随机区组设计,采用叶喷和灌根两种处理方式,分别以叶面喷施清水(CK 1-1)、叶面喷

施“益施帮”稀释液 400 倍(CK 2-1)、根部灌施清水(CK 1-2)、根部灌施“大量元素水溶肥料”稀释液 200 倍(CK 2-2)作为对照,处理为小球藻粉稀释液(300、500、1000、1500、2000 倍)分别叶喷及根灌,共 14 个处理,每个处理 3 次重复,共 42 个小区。每隔 7 d 进行叶喷、灌根处理。叶喷所有处理的用液量保持一致,保证叶片表面润湿但不成股流下;灌根用液量为每次每株 500 mL。育苗所用穴盘选用 72 孔穴盘(0.54 m×0.28 m),用蔬菜专用营养土进行育苗。于 2023 年 5 月 10 日番茄幼苗长至 4 叶 1 心时进行移栽,缓苗 7 d,分别于 2023 年 5 月 17 日、5 月 24 日、5 月 31 日进行叶喷和灌根处理,末次处理后第 7 天(2023 年 6 月 7 日)测定番茄植株和土壤的各项指标。每小区随机选取 10 株番茄植株进行测定。

#### 1.4 试验测定指标与方法

1.4.1 生长指标 末次施肥后 7 d 调查番茄生长指标,包括株高、茎粗、叶片数、叶绿素含量、地上鲜质量、地上干质量、地下鲜质量、地下干质量、壮苗指数和生长函数。

株高用直尺测定从地面到顶端生长点的高度;茎粗用游标卡尺(PD-151)测量地上部 2 cm 处的粗度;叶片数为完全展开的真叶数;利用叶绿素仪(SPAD-502 Plus)测定番茄植株顶端第二片真叶 SPAD 值;将植株冲洗干净,吸干水分后从根茎连接处分开,分别测定幼苗地上部和地下部鲜质量,再将其置于 105 °C 烘箱(DGX-9143B-1)中杀青 30 min,65 °C 烘干至恒质量,并计算壮苗指数和生长函数。

壮苗指数(S)=茎粗/(株高×10)×全株干质量;  
(1)

生长函数(G)=全株干质量/35×1000。(2)

1.4.2 植株养分测定 于末次施肥后 7 d 采集整株番茄幼苗,植株分为根系和地上两部分,洗净后 105 °C 杀青 30 min,再放置于 65 °C 烘箱内烘至恒质量后粉碎,用硫酸和过氧化氢消煮后用于植物养分含量的测定。采用自动定氮仪法(NY/T 2419—2013)测定植株全氮含量<sup>[18]</sup>,采用钼锑抗比色法(NY/T 2421—2013)测定全磷含量<sup>[19]</sup>,采用火焰光度计法(NY/T 2420—2013)测定全钾含量<sup>[20]</sup>。

1.4.3 土壤肥力 末次施肥后 7 d 对表层土壤进行采样分析,每个处理对角线五点取样,风干过筛后用于土壤理化性质和酶活性测定。

采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定铵态氮含量,采用元素分析仪法测定硝态氮、有机质和全氮

含量,采用盐酸氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量,采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定速效钾含量,采用酸度计法测定酸碱度<sup>[21-22]</sup>。

通过二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶(SC)活性;采用酚二磺酸比色法测定硝酸还原酶(NR)活性;采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶(URE)活性;采用磷酸苯二钠比色法测定酸性磷酸酶(ACP)活性;采用邻苯三酚比色法测定多酚氧化酶(PPO)活性;采用愈创木酚氧化法测定过氧化物酶(POD)活性<sup>[23]</sup>。

#### 1.5 数据统计与分析

试验结果使用 Microsoft Excel 2019 和 DPS 9.01 进行统计分析,采用 Duncan 氏新复极差法( $p < 0.05$ )进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 小球藻粉叶喷对番茄幼苗的促生效果

由表 2 可知,在各处理中,小球藻粉 500 倍液叶喷处理效果最好,对各项生长指标均有促进作用,与对照(CK 1-1)相比,株高、叶片数、叶绿素含量、生物量和生长函数显著增加 3.83%~16.34%;与生物肥料“益施帮”(CK 2-1)相比,叶绿素含量显著增加 4.02%;地上鲜质量、干质量分别显著增加 12.25%和 10.81%;地下鲜质量和干质量分别显著增加 13.54%和 11.92%;生长函数显著增加 10.91%;其余各项生长指标增加了 2.24%~9.25%。

### 2.2 小球藻粉灌根对番茄幼苗的促生效果

由表 3 可知,与对照(CK 1-2)相比,小球藻粉灌根 500 倍液处理后,番茄株高、茎粗、叶片数、生物量、壮苗指数和生长函数显著增加 10.67%~47.49%;与复合肥“大量元素水溶肥料”(CK 2-2)相比,各项生长指标均有显著的促进作用,其中叶片数、茎粗、地上和地下干质量、地上和地下鲜质量、壮苗指数、生长函数增加较多,显著增加了 18.58%~35.07%;株高和叶绿素含量分别显著增加了 8.90%和 3.77%。

### 2.3 小球藻粉对番茄幼苗全氮、全磷、全钾含量的影响

通过小球藻粉叶喷、灌根处理番茄幼苗促生效果评价,测得小球藻粉 500 倍处理效果最好,因此继续开展小球藻粉叶喷及灌根 500 倍处理对番茄氮磷钾含量、土壤理化性质及土壤酶活性的研究。

由表 4 可知,与清水对照相比,小球藻粉叶喷

表2 小球藻粉叶喷对番茄幼苗生长发育的影响

Table 2 Effects of *Chlorella vulgaris* powder leaf spray on the growth and development of tomato seedlings

生长指标 Growth index	CK 1-1	CK 2-1	小球藻粉处理倍数 Treatment multiples of <i>Chlorella vulgaris</i> powder				
			300	500	1000	1500	2000
株高 Plant height/cm	49.70±7.54 b	51.91±6.25 ab	50.43±8.28 ab	53.83±5.34 a	52.06±5.33 ab	52.47±7.51 ab	49.77±4.31 b
茎粗 Stem thickness/mm	8.60±1.55 ab	8.94±1.06 a	8.04±1.33 b	9.14±0.97 a	8.79±1.32 a	9.07±1.45 a	8.66±1.06 ab
叶片数 Number of leaves	9.87±2.36 c	10.87±1.68 abc	10.17±2.12 bc	11.40±2.13 a	11.03±1.83 ab	11.40±1.89 a	10.70±2.02 abc
叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content/SPAD	49.90±2.61 b	49.81±1.81 b	49.87±1.91 b	51.81±1.78 a	50.93±2.37 ab	49.70±2.49 b	50.44±2.31 b
地上鲜质量 Aboveground fresh mass/g	450.33±21.09 cd	457.00±14.18 c	447.00±17.45 d	513.00±14.89 a	492.33±17.16 b	496.00±16.32 b	434.33±18.13 e
地上干质量 Aboveground dry mass/g	54.01±3.14 d	56.16±4.21 c	54.64±2.15 d	62.23±3.65 a	59.51±2.26 b	60.38±1.84 b	53.24±2.17 d
地下鲜质量 Underground fresh mass/g	52.80±2.05 c	53.11±1.47 c	53.48±1.09 c	60.30±1.52 a	56.27±2.20 b	56.15±2.26 b	50.01±1.87 d
地下干质量 Underground dry mass/g	5.57±0.26 de	5.79±0.26 c	5.72±0.40 cd	6.48±0.40 a	6.02±0.28 b	6.00±0.32 b	5.47±0.19 e
壮苗指数 Strong seedling index	1.03±0.19 ab	1.07±0.30 ab	0.96±0.44 b	1.17±0.21 a	1.11±0.19 ab	1.15±0.34 a	1.02±0.14 ab
生长函数 Growth function/(mg·d <sup>-1</sup> )	1 702.29± 93.32 de	1 770.00± 121.09 c	1 724.57± 63.12 d	1 963.14± 108.07 a	1 872.28± 63.00 b	1 896.57± 55.96 b	1 677.43± 62.31 e

注:同行数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。表 2 同。

Note: After the same line of data, different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same table 2.

表3 小球藻粉灌根对番茄幼苗生长发育的影响

Table 3 Effects of *Chlorella vulgaris* powder root irrigation on the growth and development of tomato seedlings

生长指标 Growth index	CK 1-2	CK 2-2	小球藻粉处理倍数 Treatment multiples of <i>Chlorella vulgaris</i> powder				
			300	500	1000	1500	2000
株高 Plant height/cm	47.88±7.28 c	48.66±7.27 c	49.78±4.86 bc	52.99±4.05 a	51.96±6.09 ab	49.06±5.52 bc	46.57±5.50 c
茎粗 Stem thickness/mm	7.97±1.57 d	7.74±1.47 d	9.62±1.88 a	9.28±1.62 ab	8.80±1.07 abc	8.52±1.72 bcd	8.02±0.94 cd
叶片数 Number of leaves	8.10±2.17 bc	7.50±2.42 c	9.10±2.55 ab	10.13±2.66 a	8.53±2.16 bc	9.13±2.57 ab	7.93±1.72 bc
叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content/SPAD	50.08±4.75 bc	49.66±3.16 c	52.63±2.72 a	51.53±2.59 ab	50.84±2.60 bc	49.40±2.00 c	49.95±1.85 bc
地上鲜质量 Aboveground fresh mass/g	401.97±25.96 f	412.67±16.60 e	436.00±14.54 d	490.67±17.01 a	464.33±12.23 b	448.00±12.70 c	384.67±16.97 g
地上干质量 Aboveground dry mass/g	49.13±2.58 e	49.96±2.37 e	53.89±3.63 d	59.44±4.44 a	57.29±2.47 b	55.48±2.13 c	46.28±2.38 f
地下鲜质量 Underground fresh mass/g	39.34±2.81 f	48.06±1.51 c	46.26±2.12 d	56.99±3.54 a	53.01±2.36 b	45.39±1.86 d	41.30±1.52 e
地下干质量 Underground dry mass/g	4.19±0.41 f	5.17±0.32 c	4.87±0.31 d	6.18±0.34 a	5.82±0.26 b	5.05±0.25 c	4.57±0.25 e
壮苗指数 Strong seedling index	0.91±0.24 b	0.90±0.26 b	1.14±0.24 a	1.15±0.21 a	1.08±0.19 a	1.07±0.26 a	0.89±0.15 b
生长函数 Growth function/(mg·d <sup>-1</sup> )	1 523.43± 68.52 f	1 575.24± 63.72 e	1 678.76± 107.04 d	1 874.86± 128.29 a	1 803.24± 71.30 b	1 729.43± 60.42 c	1 452.86± 69.07 g

处理后地上、地下部氮含量提高,但差异不显著;地上部磷素和钾素含量均显著降低;地下部的钾素含量显著提高。与清水对照相比,小球藻粉灌根处理

后地上部和地下部的氮素含量分别显著降低 6.38%、11.00%;磷素含量变化不显著;地上部和地下部的钾素含量分别显著提高 5.71%、21.21%。综

上分析可知,小球藻粉 500 倍灌根处理效果好于叶喷处理,可显著提高番茄幼苗中钾素含量,促进植株生长,提高抗性。

2.4 小球藻粉对土壤理化性质的影响

由表 5 可知,与清水对照相比,小球藻粉 500

表 4 小球藻粉对番茄幼苗氮磷钾含量的影响

Table 4 Effects of *Chlorella vulgaris* powder on nitrogen, phosphorus and potassium content in tomato seedlings %

处理 Treatment	w(氮素) Nitrogen content	w(磷素) Phosphorous content	w(钾素) Potassium content
P-CK 1-地上部 P-CK 1-Aboveground	0.83±0.01 a	0.84±0.02 a	0.34±0.00 a
P-500-地上部 P-500-Aboveground	0.84±0.00 a	0.69±0.00 b	0.32±0.01 b
P-CK 1-地下部 P-CK 1-Underground part	1.07±0.05 a	1.11±0.01 a	0.36±0.00 b
P-500-地下部 P-500-Underground part	1.13±0.04 a	1.11±0.02 a	0.37±0.01 a
G-CK 1-地上部 G-CK 1-Aboveground	0.94±0.02 a	0.76±0.02 a	0.35±0.01 b
G-500-地上部 G-500-Aboveground	0.88±0.00 b	0.82±0.07 a	0.37±0.00 a
G-CK 1-地下部 G-CK 1-Underground part	1.00±0.03 a	1.07±0.05 a	0.33±0.00 b
G-500-地下部 G-500-Underground part	0.89±0.01 b	1.01±0.09 a	0.40±0.01 a

注:P-CK 表示叶喷对照处理,以清水作为对照,不喷施任何肥料;P-500 表示小球藻粉稀释 500 倍液叶喷处理;G-CK 表示灌根对照处理,以清水作为对照,不施任何肥料;G-500 表示小球藻粉稀释 500 倍液灌根处理。同列数据后不同小写字母表示与对照相比,在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: P-CK represents leaf spray control treatment, with clear water as control, without spraying any fertilizer; P-500 represents *Chlorella vulgaris* powder diluted 500 times liquid leaf spray treatment; G-CK represents the root irrigation control treatment, with clear water as the control, without any fertilizer; G-500 indicated that *Chlorella vulgaris* powder diluted 500 times liquid root irrigation treatment. After the same column of data, different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level compare to control. The same below.

表 5 小球藻粉对番茄土壤理化性质的影响

Table 5 Effects of *Chlorella vulgaris* powder on physical and chemical properties of tomato soil

处理 Treatment	pH	电导率 Electric conductivity/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	w(有机质) Organic matter content/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(铵态氮) Ammonium nitrogen content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(硝态氮) Nitrate nitrogen content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(有效氮) Available nitrogen content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(有效磷) Available phosphorus content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(速效钾) Rapidly available potassium content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
P-CK 1	6.39±0.01 a	276.80±2.77 a	25.82±1.86 a	56.94±0.70 a	15.64±1.29 a	72.58±0.84 a	82.84±4.40 a	155.24±3.11 b
P-500	6.33±0.02 b	253.80±2.86 b	25.13±1.11 a	58.27±0.77 a	15.74±0.97 a	74.01±1.58 a	88.51±1.99 a	169.91±7.04 a
G-CK 1	6.69±0.10 a	246.60±6.54 a	23.67±1.70 b	47.11±0.73 b	15.55±0.66 a	62.66±1.07 b	78.05±1.61 a	255.48±1.96 a
G-500	6.40±0.06 b	225.80±5.63 b	27.66±3.44 a	58.03±0.81 a	16.23±0.91 a	74.26±1.59 a	79.04±1.80 a	235.31±4.56 b

倍叶喷处理的土壤 pH 显著降低 0.94%;电导率显著降低 8.31%;有机质、铵态氮、硝态氮、有效氮和有效磷含量变化较小;速效钾含量显著提高 9.45%。小球藻粉灌根处理的土壤 pH 显著降低 4.33%;电导率显著降低 8.43%;有机质含量显著提高 16.86%;速效钾含量显著降低 7.89%。

综上分析可知,小球藻粉 500 倍液灌根和叶喷处理均可显著降低土壤 pH 和电导率,其中灌根处理比叶喷处理可更好地降低土壤 pH、电导率,显著提高有机质、铵态氮和有效氮含量。

2.5 小球藻粉对土壤酶活性的影响

由表 6 可知,与清水对照相比,小球藻粉叶喷及灌根 500 倍对土壤酶活性均有不同程度的增强作用,除酸性磷酸酶活性外,其他 6 种酶的活性均显著高于对照处理。与清水对照相比,小球藻粉 500 倍叶喷处理的土壤蔗糖酶、硝酸还原酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶活性分别显著提高 38.50%、40.52%、56.89%、66.85%、40.32%、46.00%;酸性磷酸酶活性与对照差异不显著。与清水对照相比,小球藻粉 500 倍灌根处理的土壤蔗糖酶、硝酸还原酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性分别显著提高 25.75%、22.65%、45.66%、27.83%、33.33%和 38.89%。小球藻粉 500 倍叶喷处理对土壤酶活性的增强效果优于灌根处理,叶喷处理土壤的 7 种酶活性的变化量均高于灌根处理的各种酶活性的变化量。

3 讨论与结论

小球藻中含有丰富的营养物质,如植物生长激素、多糖、氨基酸等,具有促进作物幼苗生长、调节植物代谢、提高作物产量等作用<sup>[24]</sup>。本试验结果表明,与清水对照、商品化生物肥料“益施帮”和复合肥“大量元素水溶肥料”处理相比,小球藻粉 500 倍

表6 小球藻粉对番茄土壤酶活性的影响  
Table 6 Effect of *Chlorella vulgaris* powder on soil enzyme activity of tomato (U·g<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity	硝酸还原酶活性 Nitratase activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity	脲酶活性 Urease activity	酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity	过氧化物酶活性 Peroxidase activity
P-CK 1	27.38±0.82 b	10.39±0.31 b	33.54±1.37 b	104.36±3.19 b	768.45±20.68 a	75.43±2.41 b	102.81±3.34 b
P-500	37.92±1.23 a	14.60±0.48 a	52.62±1.64 a	174.12±4.51 a	786.12±21.68 a	105.84±3.01 a	150.10±3.02 a
G-CK 1	27.07±1.08 b	11.92±0.27 b	36.90±1.66 b	102.55±2.94 b	788.99±32.05 a	74.88±1.97 b	113.50±4.47 b
G-500	34.04±0.98 a	14.62±0.45 a	53.75±2.40 a	131.09±3.63 a	788.99±13.34 a	99.84±3.32 a	157.64±6.09 a

叶喷、灌根处理均对番茄幼苗的株高、茎粗、叶片数、地上地下生物量等具有不同程度的促进作用。施用一定浓度的小球藻粉后株高、茎粗和叶绿素含量有不同程度的增加,这与赵浩健等<sup>[25]</sup>在草莓上的研究结果基本一致,一定浓度的小球藻粉对作物生长发育有促进作用,可增加作物的株高和茎粗,提高叶绿素含量。此外,施用小球藻粉500倍后,番茄地上、地下生物量均有不同程度的增加,这与边建文等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。

化肥养分含量高,肥效快,但营养元素较为单一,存在局限性。农民在化肥用量上总是凭经验估计,盲目及过量施用化肥,导致土壤板结、肥力下降等现象,因此开发更高效的生物肥料具有重要意义。前人研究表明,微藻固氮速率高,固碳能力强,能够改善土壤结构<sup>[27-28]</sup>。本研究结果表明,与对照相比,小球藻粉叶喷和灌根处理后,土壤pH显著降低,这表明施加小球藻粉能够有效减轻土壤碱化程度。土壤电导率表示土壤中水溶性离子的溶出状况,一定程度上反映盐离子的含量,小球藻粉叶喷和灌根处理后土壤电导率显著降低,说明小球藻粉具有修复盐渍化土壤的潜力。同时小球藻粉灌根处理后,土壤中铵态氮和有效氮含量均显著提高,可能与小球藻固氮能力强,且吸收空气中的氨氮和氮氧化物有关<sup>[29]</sup>,这与王建华等<sup>[30]</sup>探究小球藻对茼蒿土壤质量影响的结果基本一致。高雅晓玲<sup>[31]</sup>研究发现,增温加快了植株对土壤钾的吸收,造成土壤速效钾含量下降,本试验小球藻粉500倍灌根处理后,显著提高了番茄幼苗中钾素的含量,但土壤中速效钾的含量显著降低,推测小球藻粉可能通过促进作物本身对土壤中钾元素的吸收,导致土壤中钾元素含量相应降低。

土壤酶参与土壤中各种生物化学过程,测定酶活性,可间接了解土壤某些物质的转化情况<sup>[32]</sup>。土壤中含有50~60种酶,其中蔗糖酶活性与土壤有机质含量紧密相关,可表征土壤肥力<sup>[33]</sup>;硝酸还原酶可将土壤中的硝酸盐离子转化成氮气,维持土壤健康

和生态平衡<sup>[34]</sup>;过氧化氢酶可催化过氧化氢分解,促进土壤有机质降解,提高土壤肥力等<sup>[35]</sup>;脲酶的酶促反应物可供植物利用氮源,是一种对尿素转化起关键作用的酶;酸性磷酸酶可将有机磷和无机磷转化为可供植物吸收的磷酸盐,从而提高作物产量和品质;多酚氧化酶是一种可将芳香族化合物氧化成醌的氧化还原酶,可促进芳香族化合物循环,有利于土壤环境的修复<sup>[36]</sup>;过氧化物酶可消除过氧化氢和酚类、醛类等物质的毒害作用,在有机质氧化和腐殖质形成中起重要作用<sup>[37]</sup>。本研究表明,小球藻粉叶喷及灌根处理后,土壤中的蔗糖酶、硝酸还原酶、过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性均显著提高,仅酸性磷酸酶活性变化不大,表明小球藻粉可能通过提高土壤酶活性,提高养分转化率,提升土壤肥力,延长土壤肥效,加快植株对土壤养分的吸收,促进番茄幼苗的生长。

化学肥料虽然成分比较简单、见效快、使用方便,但是长期和大量使用会导致土壤板结、酸化、元素失衡等一系列问题,严重影响土壤恢复能力,不利于农业可持续发展<sup>[38]</sup>。生物肥料是一种高效、无污染的新型肥料,可建立土壤的良性循环,减少化肥的利用,进而获得更好的经济效益和生态效益<sup>[39]</sup>。本研究结果表明,小球藻粉500倍灌根处理与商品化“大量元素水溶肥料”复合肥相比,株高、茎粗、叶片数、叶绿素含量、地上和地下生物量、壮苗指数、生长函数均显著增加3.77%~35.07%;小球藻粉叶喷效果虽然不及灌根处理,但与生物肥料“益施帮”相比,各项生长指标也增加了2.24%~16.34%。上述结果证实,小球藻粉不仅有优于化学肥料的肥效效果,更有作为生物肥料改善土壤理化性质的特性。小球藻粉还具有生产成本低、易于储存、方便运输等特点,这些优势有助于小球藻粉进一步开发为新型生物肥料。

在实际生产应用中,叶面喷施是通过叶片表面的气孔吸收养分,灌根是将肥料送达植物根部,通过根系吸收营养,不同施用方法需根据作物及肥料

特性进行选择。本研究表明,小球藻粉 500 倍灌根和叶喷处理对番茄植株的生长均具有促进作用,可显著降低土壤 pH 和电导率,提高土壤中的酶活性和土壤养分含量。

### 参考文献

- [1] 虞铁俊,徐青山,张均华,等.土壤培肥技术对土壤健康的影响途径与作用机制[J].中国土壤与肥料,2024(2):220-227.
- [2] 李明睿.兵团第六师设施农业发展路径选择研究[D].新疆石河子:石河子大学,2019.
- [3] 付丽军,王永存,张璐,等.生物有机肥部分替代化肥对生姜产量、养分利用效率及土壤肥力的影响[J].中国瓜菜,2023,36(8):77-83.
- [4] MAGER D M, THOMAS A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(2): 91-97.
- [5] 曹丹,宗良纲,肖峻,等.生物肥对有机黄瓜生长及土壤生物学特性的影响[J].应用生态学报,2010,21(10):2587-2592.
- [6] DMYTRYK A, CHOJNACKA K. Algae as fertilizers, biostimulants, and regulators of plant growth[J]. Algae Biomass: Characteristics and Applications, 2018, 8: 115-122.
- [7] 钟慧祺,韩佩,芦骞,等.小球藻液体肥料对3种植物生长促进作用的探究[J].生物学杂志,2022,39(3):66-71.
- [8] SINGH R, PARIHAR P, SINGH M, et al. Uncovering potential applications of cyanobacteria and algal metabolites in biology, agriculture and medicine: Current status and future prospects[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 515.
- [9] GÓRKA B, KORZENIOWSKA K, LIPOK J, et al. The biomass of algae and algal extracts in agricultural production[J]. Algae Biomass: Characteristics and Applications, 2018, 8: 103-114.
- [10] 邹宁,李艳,孙东红.几种有经济价值的微藻及其应用[J].烟台师范学院学报(自然科学版),2005,21(1):59-63.
- [11] 范建华.小球藻异养/光诱导切换过程的分子响应及其功能基因组学研究[D].上海:华东理工大学,2012.
- [12] YUAN Q X, LI H, WEI Z Y, et al. Isolation, structures and biological activities of polysaccharides from *Chlorella*: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 2199-2209.
- [13] 冯兴标.基因工程改造小球藻提高其虾青素表达量[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [14] DINESHKUMAR R, SUBRAMANIAN J, GOPALSAMY J, et al. The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.) [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10(5):1101-1110.
- [15] KHOLSSI R, MARKS E A N, MIÑÓN J, et al. Biofertilizing effect of *Chlorella sorokiniana* suspensions on wheat growth[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(2): 644-649.
- [16] FAHEED F A, EL-FATTAH Z A. Effect of *Chlorella vulgaris* as bio-fertilizer on growth parameters and metabolic aspects of lettuce plant[J]. Journal of Agriculture and Social Sciences, 2008, 4(4): 165-169.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国农业部.植株全氮含量测定自动定氮仪法:NY/T2419-2013[S].北京:中国农业出版社,2013.
- [19] 中华人民共和国农业部.植株全磷含量测定钼锑抗比色法:NY/T2421-2013[S].北京:中国农业出版社,2013.
- [20] 中华人民共和国农业部.植株全钾含量测定火焰光度计法:NY/T2420-2013[S].北京:中国农业出版社,2013.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土壤硝态氮的测定紫外分光光度法:GB/T32737-2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [22] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国科学技术出版社,2000.
- [23] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2002.
- [24] 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.
- [25] 赵浩健,刘宁,张焕春,等.小球藻对草莓生长发育的促进作用研究[J].烟台果树,2023(4):35.
- [26] 边建文,王萌,刘保友,等.小球藻对小麦生长及土壤性质的影响[J].中国农学通报,2023,39(12):8-12.
- [27] SINGHANIA R R, AGARWAL R A, RRAVEEN KUMAR R, et al. Waste to wealth[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [28] ABDEL-RAOUF N, AL-HOMAIDAN A A, IBRAHEEM I B M. Agricultural importance of algae[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(54): 11648-11658.
- [29] NAYAK M, SWAIN D K, SEN R. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop[J]. Science of the Total Environment, 2019, 682: 475-484.
- [30] 王建华,圆圆,都拉娜,等.微藻生物肥改善土壤肥力提高叶用莴苣营养品质[J].中南农业科技,2023,44(7):3-5.
- [31] 高雅晓玲.不同土壤类型中大豆的产量与品质对增温的响应[D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [32] 李春霖,汤萃文,苏艳斌.荒漠生态系统土壤酶活性研究进展[J].绿色科技,2023,25(16):54-59.
- [33] 蒋强,刘子凡,王燕武,等.生物有机肥替代化肥对樱桃番茄产量、品质及土壤理化性质的影响[J].中国瓜菜,2023,36(10):71-77.
- [34] 冯杨.低氮胁迫下番茄 *SIGRF4* 提高氮素利用的作用机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [35] 袁丁.基于 Meta 分析的中国长期施肥对土壤微生物性状的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.
- [36] 郝建朝,吴沿友,连宾,等.土壤多酚氧化酶性质研究及意义[J].土壤通报,2006,37(3):470-474.
- [37] 刘宝,李大伟,程伟,等.硒处理对侧柏种子激发效应及生理机制研究[J].防护林科技,2023(4):28-30.
- [38] 王文慧,蒋志慧,张纪,等.生物炭对大豆根际土壤酶活性及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2023(6):147-153.
- [39] 李武阳,崔岩,孟宪刚,等.微藻生物肥制备及农业应用研究进展[J].山东农业科学,2022,54(8):144-150.