



刘宇, 陈娇月, 赵飞, 刘小平, 张强, 周立宏, 高游慧. 农用酵素对有机番茄高品质生产的作用[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 137-152.
LIU Yu, CHEN Jiaoyue, ZHAO Fei, LIU Xiaoping, ZHANG Qiang, ZHOU Lihong, GAO Youhui. Effects of agricultural Jiaosu on the high-quality production of organic tomato[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 137-152.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.15

农用酵素对有机番茄高品质生产的作用

刘宇¹ 陈娇月¹ 赵飞² 刘小平³ 张强⁴ 周立宏⁵ 高游慧^{1*}

- (1. 中国农业大学农学院, 北京 100193;
2. 北京平仁农业发展有限公司, 北京 102200;
3. 四川省泸县农业农村局, 四川 泸州 646100;
4. 山西省灵丘县东河南镇人民政府, 山西 大同 034400;
5. 山西省灵丘县现代农业发展中心, 山西 大同 034400)

摘要 为探究农用酵素在有机番茄种子发芽和种植过程中的提质作用, 以番茄品种‘苹果青’为试验材料, 进行了发芽试验和栽培试验; 发芽试验中, 使用商品育苗(S)和农场自制(Z)基质, 每种基质都设置农用酵素(JS)和自来水(CK)处理, 测定番茄种子的发芽势和发芽率; 在栽培试验中, 采用裂区设计, 主区为农用酵素处理(灌根 250 mL+地上部喷施 20 mL, J₁), 以等量水替代酵素为对照(J₀), 以 15(Y₁)、45(Y₂)、75(Y₃) t/hm² 有机肥用量为副区, 共 6 个处理, 测定番茄株高、茎粗、节间长度、叶片 SPAD、产量、品质、土壤养分等指标, 对品质综合评价值(D)最高的农用酵素灌溉处理的土壤微生物群落结构变化进行分析。结果表明: 1) 农用酵素处理可以提高番茄种子发芽势和发芽率。ZJS 的发芽势和发芽率分别比 ZCK 上升 26.7% 和 4.3%; SJS 的发芽势和发芽率分别比 SCK 升高 2.3% 和 2.0%。2) 栽培试验中, 农用酵素处理可促进植株健康生长、提升番茄产量和品质。其中, J₁ 的番茄茎粗相较于 J₀ 增加 6.4%~7.1%, SPAD 升高 6.3%~7.1%, 植株节间缩短 11.9%~21.2%, 产量增加 9.7%~16.9%; Y₁、Y₂ 有机肥用量下 J₁ 果实中的番茄红素含量、维生素 C 含量、糖酸比分别较 J₀ 升高 55.7%~70.7%、7.2%~17.0%、24.2%~33.4%, 且各有机肥用量下 J₁ 果实品质指标综合评价值均高于 J₀。3) 农用酵素可以改善土壤养分状况与微生物群落结构。J₁ 的土壤有机质含量较 J₀ 升高 24.2%~43.6%, 硝态氮含量较 J₀ 升高 17.3%~28.0%; 土壤细菌和真菌群落丰富度较 J₀ 分别下降 12.2% 和 22.8%, 但土壤中子囊菌门的真菌丰度上升 6.24%, 厚壁菌门和酸杆菌门的细菌丰度分别上升 6.31% 和 11.33%。综上, 施用农用酵素可有效提升有机番茄优质高产的生产效能。

关键词 番茄; 农用酵素; 发芽; 种植技术; 土壤微生物

中图分类号 S641.2 文章编号 1007-4333(2024)06-0137-16 文献标志码 A

Effects of agricultural Jiaosu on the high-quality production of organic tomato

LIU Yu¹, CHEN Jiaoyue¹, ZHAO Fei², LIU Xiaoping³, ZHANG Qiang⁴, ZHOU Lihong⁵,
GAO Youhui^{1*}

- (1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Beijing Pingren Agricultural Development Co., Ltd., Beijing 102200, China;
3. Agricultural and Rural Affairs of Lu County, Sichuan Province, Luzhou 646100, China;
4. People's Government of Donghenan Town, Shanxi Province, Datong 034400, China;
5. Modern Agricultural Development Center of Lingqiu County, Shanxi Province, Datong 034400, China)

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901103)

第一作者: 刘宇 (ORCID: 0009-0003-2300-3570), 硕士研究生, E-mail: sy2023010151@cau.edu.cn

通讯作者: 高游慧 (ORCID: 0009-0008-0415-1830), 博士后, 主要从事有机农业栽培技术及农业废弃物资源转化研究, E-mail: gyohui@cau.edu.cn

Abstract In order to explore the role of agricultural Jiaosu (AJ) in improving the quality of organic tomato during germination and planting, germination and cultivation experiments were carried out by taking tomato variety 'Pingguoqing' as experimental material. In the germination experiment, the commercial seedling (S) and farm-made (Z) substrates were used, and each substrate was treated with AJ (JS) and water (CK), respectively. The germination energy and germination rate of tomato seeds were determined; In the cultivation experiment, a split zone design was adopted. In the main zone, the amount of AJ root irrigation 250 mL + aboveground spraying 20 mL (J_1) were applied, meanwhile the control is to replace AJ with an equal amount of water (J_0). In secondary zone, the amount of 15 (Y_1), 45 (Y_2) and 75 (Y_3) t/hm² organic fertilizer were designated. There were 6 treatments in total. The plant height, stem diameter, internode length, leaf SPAD, yield, quality and soil nutrients of tomato were measured, and the changes of soil microbial community structure under the treatment with the highest comprehensive evaluation value (D) of quality were measured. The results showed that: 1) AJ improved the germination energy and germination rate of tomato seeds. The germination energy and germination rate of ZJS were 26.7% and 4.3% higher than those of ZCK, and the germination energy and germination rate of SJS were 2.3% and 2.0% higher than those of SCK, respectively. 2) In the cultivation experiment, AJ promoted the healthy growth of plants and improved the yield and quality of tomato. Compared with J_0 , the stem diameter of tomato treated with J_1 increased by 6.4%-7.1%, the SPAD increased by 6.3%-7.1%. The plant internode shortened by 11.9%-21.2%, and the yield increased by 9.7%-16.9%. Under the amount of Y_1 and Y_2 organic fertilizer, the lycopene content, vitamin C content and sugar-acid ratio of J_1 fruit increased by 55.7%-70.7%, 7.2%-17.0% and 24.2%-33.4%, respectively. Compared with J_0 , and the comprehensive evaluation value of fruit quality of J_1 was higher than that of J_0 . 3) AJ improved soil nutrient status and microbial community structure. Compared with J_0 , the content of soil organic matter of J_1 increased by 24.2%-43.6%, the content of nitrate nitrogen increased by 17.3%-28.0%, and the richness of soil bacterial and fungal communities respectively decreased by 12.2% and 22.8% compared with J_0 . However, the fungal abundance of the phylum Ascomycota in the soil increased by 6.24%, and that of Firmicutes and Acidobacteria increased by 6.31% and 11.33%, respectively. In summary, AJ effectively enhanced the germination of tomato seeds in different substrates, improved the plant type and leaf photosynthetic capacity of tomato, and increased the contents of soil organic matter and nitrate nitrogen. At the same time, it also increased the abundance of microorganisms such as Ascomycetes and *Bacillus*, promoted the growth and development of plants, which makes it can be used for high-quality and high-yield cultivation of organic tomato.

Keywords tomato; agricultural Jiaosu; germination; planting techniques; soil microorganisms

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)为喜温怕涝的茄科植物,是全世界栽培最为普遍的茄果类蔬菜之一^[1]。我国是鲜食和加工番茄生产大国之一^[2],巨大的消费市场使得番茄产业不断发展壮大。为了保障番茄正常生产,大量激素与农药化肥被使用,常引起农药残留、品质下降和风味变淡等问题^[3]。目前,优质番茄在市场上处于供不应求的状态,而高端有机番茄的生产又存在技术要求较高、投入较大的特点^[4]。因此,让有机番茄种植向高品质低成本方向转化,对有机番茄产业发展有着重要的意义。

农用酵素是利用废弃有机物料、红糖和水以3:1:10的质量比混合厌氧发酵3个月以上形成的集

有益菌群、有机酸、氨基酸等有效活性成分于一体的微生态系统^[5]。已有研究表明农用酵素是一种价廉质优的绿色有机投入品,其在农业上应用可以起到改良土壤、促进植物生长、提升作物品质和加强植物对病害免疫力的作用^[6-7]。在土壤改良方面,韩剑宏等^[8]研究表明在盐碱土壤中施用农用酵素一段时间后,土壤的总磷、总氮和有机质含量显著增加。杨园媛等^[9]研究发现,在甘蓝栽培前把农用酵素施入土壤,土壤中的速效钾、速效氮含量均显著增加,其中速效钾增加了17.08%;在促进作物生长发育和提升果实品质方面,沈奕等^[10]研究表明施用复合农用酵素、生物质炭可显著提高番茄植株的株高、叶绿素相对含量和果实产量,同时改善番茄果实品

质。韩亚萍^[11]的研究表明用亚硒酸钠溶液与稀释 50× 的农用酵素混合液对番茄进行灌根,可以显著提高番茄幼苗叶绿素含量,改善幼苗光合特性,提高番茄果实品质;在作物防病方面,朱丽梅等^[12]使用大蒜酵素防治黄瓜叶霉病的结果表明,使用农用酵素的防治效果明显优于其他处理,防治效果最高可达 82.55%。另外,刘艳娜等^[13]研究表明采用紫苏、薄荷、香矢车菊等芳香源植物制作的农用酵素,能够提升梨的品质并对梨黑星病、轮纹病、腐烂病具有良好防治效果。目前关于农用酵素对有机番茄出苗、种植和土壤微生物结构影响的研究鲜见报道,本研究将农用酵素应用于有机番茄发芽和栽培过程中,测定种子发芽势和发芽率以及开花坐果期番茄株高、茎粗、节间长度、叶片 SPAD、产量、品质、土壤养分等指标,旨在探究农用酵素在有机番茄出苗、生长、产量、品质等方面的提质效应,以期为提高有机番茄生产效能提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 4—10 月在山西省大同市灵丘县东河南镇平人农场(39°24′ N, 114°05′ E)进行。灵丘县平均海拔 1 250 m,年平均气温 7℃,≥10℃ 的积温 2 887.3℃,无霜期 145 d 左右,年平均降雨量 433.3 mm,属于温带大陆性气候^[14]。试验地前茬作物为豆角,土壤含有机质 10.41 g/kg,全氮

0.80 g/kg,碱解氮 81.80 mg/kg,有效磷 8.02 mg/kg,速效钾 119 mg/kg,pH 8.41。

1.2 试验材料

选用北京地方名优番茄品种‘苹果青’为试验材料,生育期 70~75 d,由平人农场提供。苦参酵素、果蔬酵素和动物血酵素来源于中国农业大学农学院全域有机农业课题组,均由主要原料(废弃果蔬、苦参、猪血)、红糖和水以 3:1:10 的质量比混合厌氧发酵 6 个月以上制得。本研究中所使用的农用酵素是由果蔬酵素和苦参酵素以 1:1 的体积比混合而成。发芽试验所用自制基质是以羊粪:珍珠岩按 3:1 的质量比混合而成,商品基质购自佛山市好苗旺土农业有限公司,主要成分为进口泥炭、椰糠、珍珠岩、腐殖质。种植试验所用的有机肥由牛粪、蘑菇渣经过好氧发酵充分腐熟制成。

1.3 试验设计

1.3.1 发芽试验

分别使用农场自制基质(Z)和商品育苗基质(S),每种基质都设置农用酵素(JS)和自来水(CK)处理,共 4 个处理,见表 1。处理基质的方法具体为:向基质中添加自来水或稀释 50× 的农用酵素溶液至含水率为 70%。采用穴盘育苗的方式,50 孔育苗盘,番茄种子 2 粒/穴。播种完成后控制适宜的土壤水分和温度,观察记录不同处理番茄种子的发芽情况,每个处理设 3 次重复。

表 1 发芽试验各处理
Table 1 Treatment in germination experiment

处理 Treatment	基质类型 Type of seedling substrate	基质处理 Substrate treatment
ZCK	农场自制(Z) Farm-made	自来水
ZJS		稀释 50× 农用酵素
SCK	商品育苗(S) Commercial	自来水
SJS		稀释 50× 农用酵素

1.3.2 种植试验

种植试验采用裂区设计,主区为灌溉时农用酵素的使用量,副区为有机肥用量。灌溉时农用酵素使用量设置 2 个水平:灌根 250 mL+地上部喷施 20 mL(J₁)、以等量自来水为对照(J₀)。有机肥用量

设置低、中、高 3 个水平:15(Y₁)、45(Y₂)、75(Y₃)t/hm²,见表 2。有机肥作为底肥一次性施入。农用酵素的灌溉方法具体为根据农场日常番茄种植灌溉频率,每个小区使用 250 mL 农用酵素稀释 200× 后灌根,番茄缓苗后使用 20 mL 农用酵素稀释 300×

后均匀喷施地上部,每隔 10 d 一次,共计 6 次。番茄进入花果期后,需在农用酵素中按 50% 的体积比例加入动物血酵素后使用。对照(J₀)则是使用自来水代替农用酵素,操作同上。每个处理重复 3 次。每个试验小区的大小为 5 m × 4 m,单垄双行,垄内行间距 25 cm,株距 50 cm,垄间距 100 cm,采用育苗移栽的方式种植。种植试验所用番茄苗于 6 月 14 日移栽定苗,7 月 7 日番茄开始进入花果期,8 月 16 日开始起番茄陆续成熟,开始分批采收,于 10 月 19 日停止采收。

表 2 栽培试验各处理
Table 2 Treatment in cultivation experiment

处理 Treatment	有机肥用量/(t/hm ²) Application rate of organic fertilizer	灌根用量/ mL Root-irrigation dose	地上部喷施量/ mL Aboveground spraying dose
Y ₁ J ₀	15	自来水 250	自来水 20
Y ₁ J ₁	15	AJ 250	AJ 20
Y ₂ J ₀	45	自来水 250	自来水 20
Y ₂ J ₁	45	AJ 250	AJ 20
Y ₃ J ₀	75	自来水 250	自来水 20
Y ₃ J ₁	75	AJ 250	AJ 20

注:AJ,农用酵素。农用酵素在灌根时稀释 200×,地上部喷施时稀释 300×使用。
Note: AJ, agricultural Jiaosu. Agricultural Jiaosu is diluted by 200× during root irrigation and diluted by 300 × during aboveground spraying.

1.4 测定指标及方法

1.4.1 发芽试验指标

分别于种子播种后的第 7 和 17 天统计发芽种子数量。根据统计数据计算发芽势和发芽率,计算公式如下:

发芽势=第7天发芽种子数 / 播种种子数 × 100% (1)

发芽率=第17天发芽种子数 / 播种种子数 × 100% (2)

1.4.2 植株生长指标

使用卷尺和游标卡尺测定番茄植株株高,第一、第二节间的长度和茎粗;采用便捷式叶绿素测定仪 SPAD-502 Plus 测量番茄植株的倒数第二片完全展开叶 SPAD,每个处理 3 次重复。

1.4.3 产量

于番茄的成熟期在每个小区内随机选择 12 株长势均一的番茄,记录果实总重量和个数,计算番茄的单果重和单株结果数,根据株行距换算产量。

1.4.4 品质指标

在果实成熟中期,摘取不同小区成熟度一致且大小均一的同穗番茄果实用于其品质指标的测定。

番茄红素利用分光光度法^[15]检测;维生素 C 采用二苯比色法^[3]测定;可溶性固形物含量采取手持式折光仪法^[3]测定;可溶性糖采用蒽酮比色法^[16]测定;总酸采用酸碱滴定法^[3]检测;糖酸比为可溶性糖含量与总酸含量的比值。参考陈露等^[17]的方法通过主成分分析和隶属函数综合分析法对品质进行综合评价,综合指标隶属函数值(U(X_j))计算公式如下:

U(X_j)=(X_j-X_{min}) / (X_{max}-X_{min}) (j=1,2,...,n) (3)

式中:X_j、X_{min} 和 X_{max} 依次表示每个试验材料中第 j 个综合指标、最小值和最大值。

权重(W_j)计算公式如下:

W_j=P_j / ∑_{j=1}ⁿ P_j (j=1,2,...,n) (4)

式中:P_j为所有试验材料第 j 个综合指标的贡献率。

综合评价值(D)计算公式如下:

D=∑_{j=1}ⁿ [U(X_j)× W_j] (j=1,2,...,n) (5)

1.4.5 土壤养分指标测定

采用五点取样法采取土壤样品进行测定,总钾采用碱熔-火焰光度法测定^[18];总磷采用碱熔-钼锑

抗分光光度法^[19]测定;铵态氮采用KCl浸提-靛酚蓝比色法^[20]测定;硝态氮采用酚二磺酸比色法^[21]测定;有机质采用重铬酸钾容量-稀释热法^[22]测定。

1.4.6 土壤微生态指标测定

选取种植试验中品质综合评价值(D)最高的农用酵素灌溉处理和对照处理的土壤,测定土壤的微生物多样性。土壤样品送至上海派森诺生物有限公司采用Illumina Miseq 测序技术进行细菌16S-V3V4区和真菌ITS-V1区的高通量测序。

1.5 数据分析

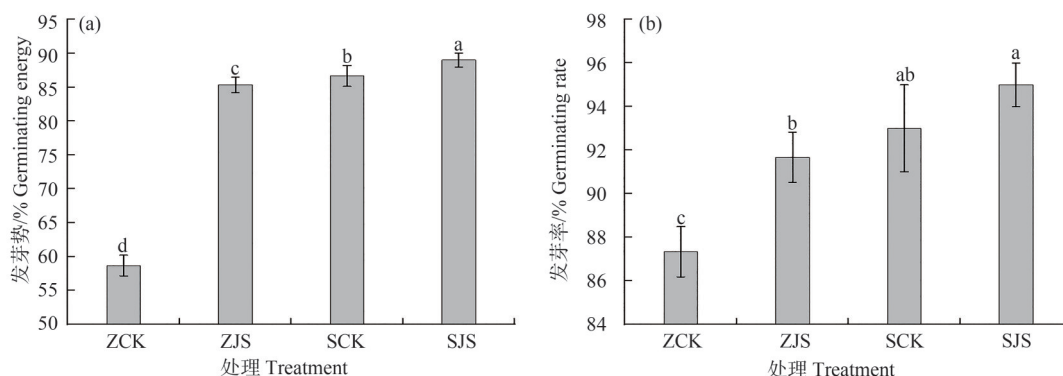
使用Microsoft Excel 2016 进行整理记录,使用Origin 2021 和 Adobe Illustrator 2022 绘制图表,微生物分析与作图在派森诺基因云平台 QIIME2

(2019.4)完成,使用SPSS27.0 进行相关性分析与主成分分析。

2 结果与分析

2.1 农用酵素处理对番茄种子出苗的影响

由图1可知,无论是农场自制基质(Z)还是商品育苗基质(S),与对照(CK)相比,使用稀释50×的农用酵素处理基质(JS)都可使番茄种子的发芽势和发芽率升高,提升出苗质量。在农场自制基质中,ZJS的番茄种子发芽势和发芽率分别较ZCK升高26.7%和4.3%($P<0.05$,下同);在商品育苗基质中,SJS的番茄种子发芽势为89%,较SCK升高2.3%。发芽率较SCK升高2.0%,但差异未达到显著水平。



Z, 农场自制基质; S, 商品育苗基质; CK, 自来水处理基质; JS, 稀释50×的农用酵素处理基质。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Z, farm-made substrate; S, commercial substrate; CK, wetting substrate with water; JS, wetting substrate with mixed AJ diluted 50 ×. Different small letters indicates significant difference ($P<0.05$) The same below.

图1 不同处理下番茄种子的发芽势(a)与发芽率(b)

Fig. 1 Germination energy (a) and rate (b) of tomato seeds in different treatments

2.2 农用酵素灌溉对番茄有机种植的影响

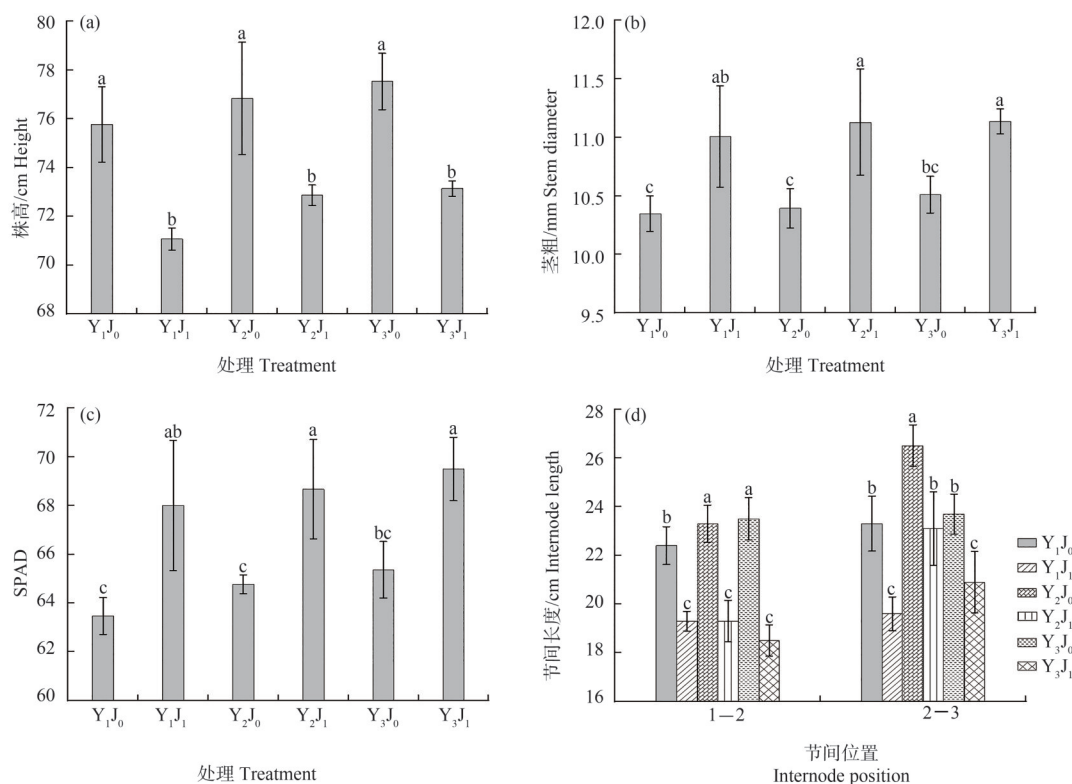
2.2.1 农用酵素灌溉对有机番茄生长的影响

由图2可知,不同有机肥用量下,使用农用酵素灌根250 mL+地上部喷施20 mL(J_1)处理的植株株高均显著低于对照处理(J_0)($P<0.05$),使用农用酵素处理后株高平均降低4 cm左右。茎粗的变化与株高相反,所有 J_1 下番茄茎粗均显著高于 J_0 ($P<0.05$), J_1 的茎粗最大达11.14 mm,且茎粗均在11.00 mm以上,比 J_0 的番茄茎粗高出6.4%~7.1%($P<0.05$)。在所有有机肥用量中, J_1 的番茄植株第一、第二节间均比 J_0 的短,并具有显著性差异($P<0.05$)。 J_1 处理下的番茄第一节间均在19.3 cm以下,比 J_0 处理缩短13.9%~21.2%($P<0.05$),第二

节间长度均在23.1 cm以下,比 J_0 处理缩短11.9%~15.8%($P<0.05$)。 J_1 的番茄SPAD均在68以上,比 J_0 高出6.3%~7.1%($P<0.05$),叶片在外观上表现更绿,表明农用酵素灌溉可以提高SPAD,使其具有更强的光合能力。

2.2.2 农用酵素灌溉对有机番茄产量的影响

由图3可知,各有机肥处理中, J_1 的番茄单果重均显著低于 J_0 ($P<0.05$),但是在有机肥45 t/hm²(Y_2)的处理中 J_1 与 J_0 间并无显著差异。在单株结果数方面, J_1 处理也显著高于 J_0 处理,不同的有机肥处理中, J_1 的番茄单株结果数均在13个以上,最高达到15个(Y_3J_1)。 J_1 的番茄产量均显著高于 J_0 ($P<0.05$),增产幅度为9.7%~16.9%。此外, Y_1 的产



Y₁、Y₂和Y₃分别为有机肥用量15、45和75 t/hm²。J₀,灌根250 mL水+地上部喷施20 mL水;J₁,灌根250 mL农用酵素+地上部喷施20 mL农用酵素。下同。

Y₁, Y₂ and Y₃ are organic fertilizer application rate 15, 45 and 75 t/hm², respectively. J₀, 250 mL water for root irrigation + 20 mL water for aboveground spraying; J₁, 250 mL AJ for root irrigation + 20 mL AJ for aboveground spraying. The same below.

图2 不同处理的番茄植株株高(a)、茎粗(b)、SPAD(c)和节间长度(d)

Fig. 2 Plant height (a), stem diameter (b), SPAD (c), and internode length (d) of tomato plants under different treatments

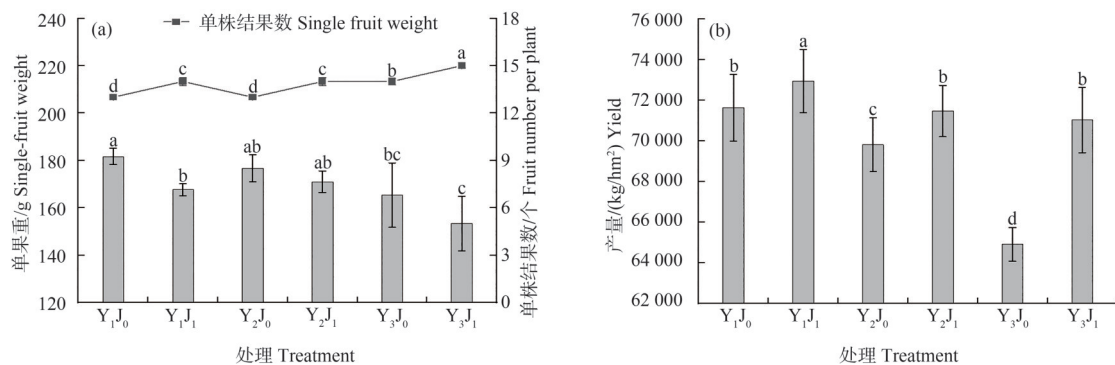


图3 不同处理的番茄单果重、单株结果数(a)和产量(b)

Fig. 3 Tomato single fruit weight, number of fruits per plant (a) and yield (b) under different treatments

量均显著高于Y₂和Y₃($P < 0.05$),随着有机肥用量增加,产量没有随之升高。

2.2.3 农用酵素灌溉对有机番茄品质的影响

由图4可知,不同处理间番茄果实可溶性固形物含量无显著差异,不同有机肥用量、灌溉时农用

酵素使用量对番茄可溶性固形物含量的影响均不显著。J₁处理的果实番茄红素含量显著高于J₀处理($P < 0.05$),在不同的有机肥用量中J₁处理的果实番茄红素含量均在158.00 μg/g以上,最高达到了224.61 μg/g(Y₃J₁),J₀处理的果实番茄红素含量则

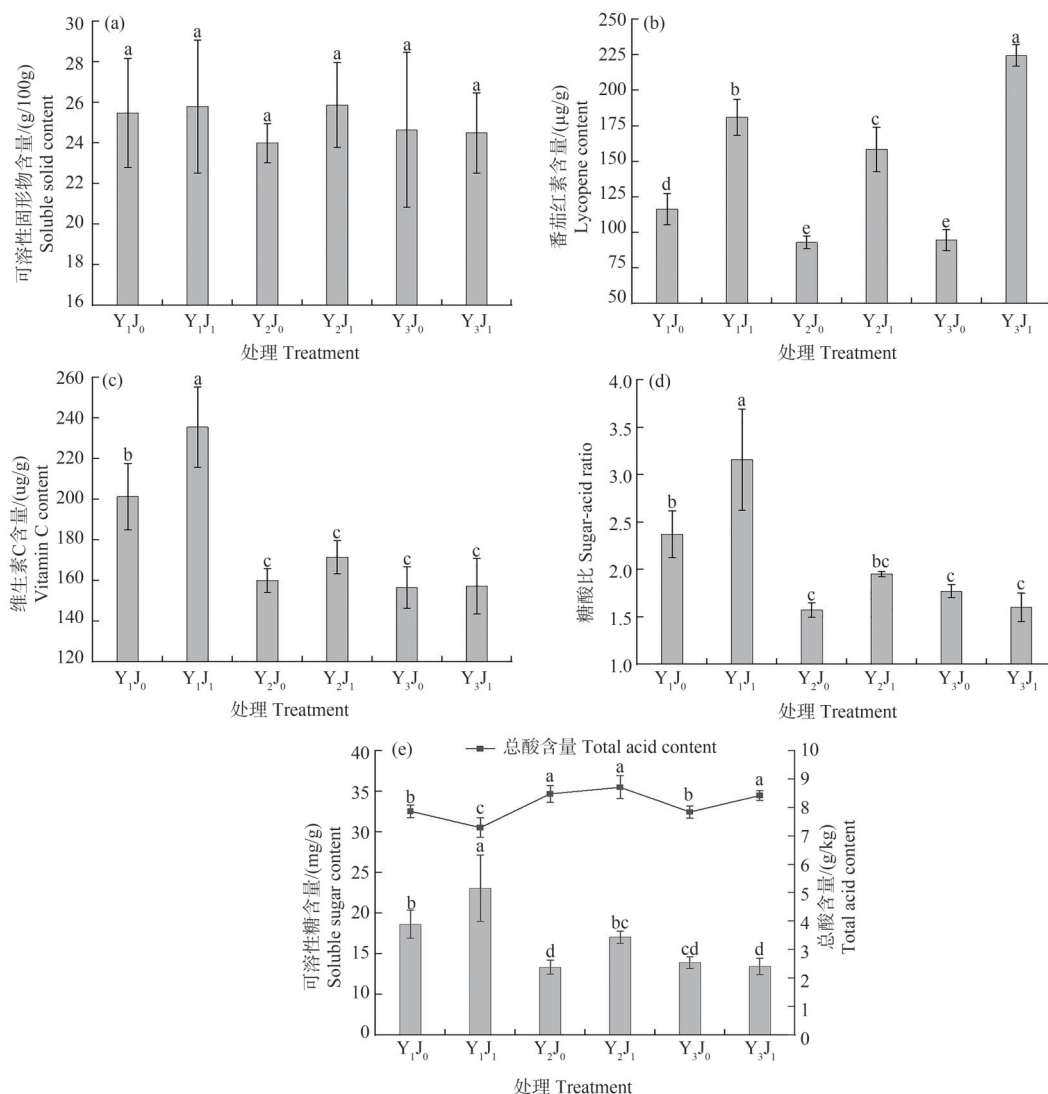


图4 不同处理的番茄可溶性固形物(a)、番茄红素(b)、维生素C(c)、糖酸比(d)、可溶性糖和总酸含量(e)

Fig. 4 Soluble solids content (a), lycopene (b), vitamin C (c), sugar-acid ratio (d), soluble sugar and total acid (e) of tomato in different treatments

均在116.31 $\mu\text{g/g}$ 以下, J_1 处理的果实番茄红素比 J_0 处理的番茄高出55.7%~137.5% ($P<0.05$)。 J_1 处理的番茄维生素C含量同样高于 J_0 处理, 但只在有机肥用量15 t/hm^2 (Y_1)处理下表现出了显著差异 ($P<0.05$), 并且也达到了各处理中的最高, 为235.58 $\mu\text{g/g}$, 是相同有机肥用量下 J_0 处理的1.17倍。在 Y_1 处理中, J_1 处理的番茄果实总酸含量显著低于 J_0 处理 ($P<0.05$), 随着有机肥用量的增加这种降低的效果逐渐减弱, 在 Y_2 处理中 J_1 和 J_0 果实总酸含量无显著差异, 在 Y_3 处理中 J_1 的番茄果实总酸含量显著高于 J_0 ($P<0.05$)。在可溶性糖含量上, Y_1 、 Y_2 中 J_1 处理的番茄果实可溶性糖含量都显著高于 J_0 处理

($P<0.05$), 同时 Y_3 中 J_1 和 J_0 间无显著差异。从糖酸比的角度来看, Y_1 、 Y_2 处理下, J_1 处理要显著优于 J_0 处理 ($P<0.05$), 说明在一定有机肥用量的条件下, 施用农用酵素可以改善番茄的适口性。

2.2.4 有机番茄品质的综合评价

由表3可知, 主成分 PC_1 、 PC_2 、 PC_3 的特征值依次为2.657、1.020和0.307, 根据累计贡献率 $\geq 85\%$ 的原则, 选择了 PC_1 和 PC_2 , 其贡献率分别是66.43%和25.49%, 累计贡献率达91.92%。因此, 本研究将最初的4个指标转换成2个相对独立的综合指标对番茄的品质进行综合评价。在 PC_1 中, 总酸、维生素C和番茄红素为主要作用因子, 其因子载

表3 各综合指标的特征值及贡献率
Table 3 Characteristic value and contribution rate of each comprehensive index

成分 Component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution rate	累积贡献率/% Accumulated contribution rate
PC ₁	2.657	66.431	66.431
PC ₂	1.020	25.488	91.919
PC ₃	0.307	7.665	99.584

荷分别为-0.843、0.982和0.962;PC₂中,番茄红素为主要作用因子,其因子载荷分别为0.959(表4)。在获得各主成分综合指标贡献率的基础上,利用隶属函数值和各综合指标的权重计算出不同处理的

表4 各综合指标值的因子载荷矩阵
Table 4 Factor loading matrix of each comprehensive index value

指标 Character	主成份 Principle component	
	PC ₁	PC ₂
番茄红素 Lycopene	0.238	0.959
总酸 Total acid	-0.843	0.312
VC	0.982	-0.009
可溶性糖 Soluble sugar	0.962	0.045

综合排序,结果表明,不同有机肥用量下,农用酵素灌溉处理的综合评价值(*D*)高于对照处理,且在低有机肥用量(*Y*₁)的处理下得分最高,综合评价排名为*Y*₁*J*₁>*Y*₁*J*₀>*Y*₃*J*₁>*Y*₂*J*₁>*Y*₃*J*₀>*Y*₂*J*₀,见表5。

表5 不同处理综合指标值、权重、隶属函数值、*D*及综合评价
Table 5 Comprehensive index value, weight, membership function value, *D* value and comprehensive valuation of different treatments

处理 Treatment	综合指标值 Comprehensive index value		隶属函数值 Membership function value		<i>D</i>	综合评价 Comprehensive valuation
	<i>F</i> ₁	<i>F</i> ₂	<i>U</i> ₁	<i>U</i> ₂		
<i>Y</i> ₁ <i>J</i> ₀	0.531	-0.625	0.523	0.168	0.424	2
<i>Y</i> ₁ <i>J</i> ₁	1.799	0.241	1.000	0.495	0.860	1
<i>Y</i> ₂ <i>J</i> ₀	-0.856	-0.736	0.000	0.126	0.035	6
<i>Y</i> ₂ <i>J</i> ₁	-0.402	0.610	0.171	0.634	0.299	4
<i>Y</i> ₃ <i>J</i> ₀	-0.455	-1.070	0.151	0.000	0.109	5
<i>Y</i> ₃ <i>J</i> ₁	-0.616	1.579	0.090	1.000	0.343	3
权重 Weight	0.723	0.277				

2.2.5 农用酵素灌溉对有机番茄土壤养分的影响
由表6可知,与*J*₀相比,*J*₁中*Y*₁、*Y*₂、*Y*₃的番茄土壤有机质含量分别升高24.16%、43.58%、27.72% ($P<0.05$),硝态氮含量分别升高28.04%、17.29%、21.5% ($P<0.05$),铵态氮含量分别升高75.74%、49.1%、167.92% ($P<0.05$)。此外,不同处理对土壤总钾含量的变化并没有起到较好的效果。各有机肥用量之间*J*₁的土壤总磷含量与*J*₀无显著差异,但*Y*₁的土壤总磷含量显著低于*Y*₂和*Y*₃

($P<0.05$)。

2.2.6 农用酵素灌溉对有机番茄土壤微生物的影响

由图5可知,曲线随着序列的增加最终都趋于平缓,说明继续增加测序深度已无法检测到大量的尚未发现的新ASV,测序结果足够反映当前样本所包含的细菌与真菌的多样性。

由图6可知,相较于*J*₀和*J*₁的细菌群落Chao1指数和物种数分别降低8.31%和8.30%;真菌群落

表 6 不同处理下土壤有机质、硝态氮、铵态氮、总钾和总磷含量

Table 6 Soil organic matter, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total potassium, and total phosphorus content under different treatments

处理 Treatment	有机质/(g/kg) Soil organic matter	硝态氮/(mg/kg) Nitrate nitrogen	铵态氮/(mg/kg) Ammonium nitrogen	总钾/(g/kg) Total potassium	总磷/(g/kg) Total phosphorus
Y ₁ J ₀	23.14±0.28 b	35.73±1.38 c	1.36±0.02 d	19.34±0.38 c	0.71±0.08 b
Y ₁ J ₁	28.73±0.21 a	45.75±1.91 a	2.39±0.06 b	18.49±0.27 d	0.75±0.03 b
Y ₂ J ₀	20.63±0.64 c	39.56±0.44 b	1.12±0.36 d	20.19±0.51 ab	0.79±0.02 a
Y ₂ J ₁	29.62±0.69 a	46.40±1.13 a	1.67±0.04 c	19.74±0.36 bc	0.85±0.04 a
Y ₃ J ₀	22.76±0.79 b	37.81±1.49 bc	2.65±0.11 b	19.53±0.29 c	0.84±0.02 a
Y ₃ J ₁	29.07±0.70 a	45.94±3.53 a	7.10±0.15 a	20.69±0.16 a	0.83±0.02 a

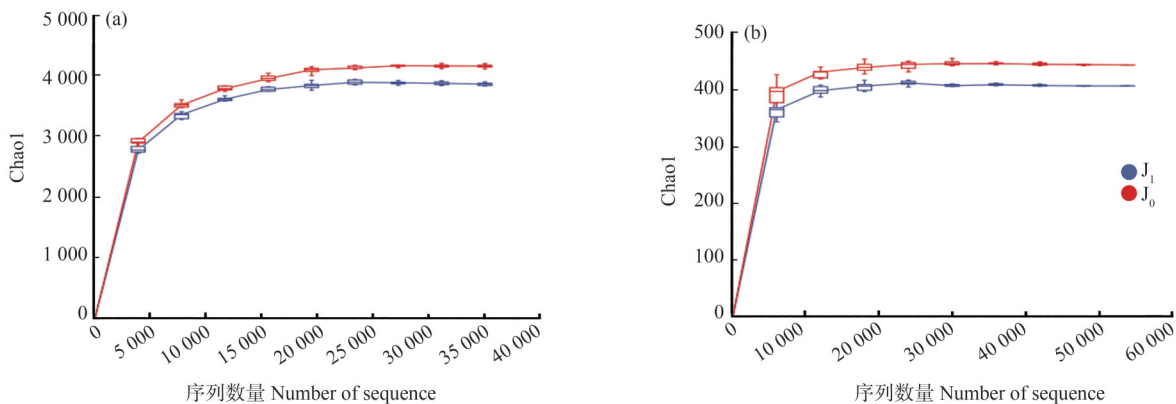


图 5 不同处理下土壤细菌(a)和真菌(b)Chao1 指数稀疏曲线

Fig. 5 Sparse curves of soil bacterial (a) and fungal (b) Chao1 index under different treatments

Chao1 指数和物种数分别降低 7.06% 和 5.65%，说明 J₁ 样本中估计的 ASV 数小于 J₀，其细菌和真菌群落的丰富度均降低。由表征群落多样性的香农指数可见，J₀ 与 J₁ 的细菌或真菌群落多样性无显著差异。此外，无论是细菌群落还是真菌群落 Goods₁ coverage 指数均>97%，说明本次测序样本文库覆盖率较高，测序结果可以代表样本微生物的真实情况。

由图 7 可知，在细菌群落丰富度上，J₁ 包含 5 053 个特有 ASV，J₀ 包含 5 676 个特有 ASV，两者共有 3 044 个 ASV，J₁ 较 J₀ 减少了 12.2%。在真菌群落丰富度上，处理间拥有与细菌群落相同的差异现象，J₁ 特有真菌 ASV 356 个，J₀ 特有真菌 ASV 437 个，两者共有 ASV 416 个，J₁ 较 J₀ 减少了 22.8%。

由图 8 可知，在细菌群落门水平分类上，2 个土壤样本排名前七的优势门类相同，依次是变形菌门（Proteobacteria）、放线菌门（Actinobacteria）、酸杆菌门（Acidobacteria）、芽单胞菌门

（Gemmatimonadetes）、厚壁菌门（Firmicutes）、绿弯菌门（Chloroflexi）、拟杆菌门（Bacteroidetes），但不同细菌门类的丰度占比有所差别。J₁ 的变形菌门、放线菌门和芽单胞菌门占比分别为 32.12%、24.67% 和 7.99%，均低于 J₀ 的 33.89%、26.53% 和 8.21%，但是其厚壁菌门（9.44%）、酸杆菌门（11.98%）却高于 J₀（6.31%、11.33%）。在真菌群落门水平分类上，2 个土壤样本真菌群落都是子囊菌门（Ascomycota）占绝对优势，其次是霉菌门（Mortierellomycota），其中 J₁ 的子囊菌门丰度（83.20%）高于 J₀（76.96%），而 J₀ 的霉菌门丰度（2.59%）高于 J₁（1.72%）。

进一步对样本数据进行 LEfSe 分析，在 LDA 阈值>2.5 的条件下筛选不同处理下的标志细菌及标志真菌，如图 9 所示。J₀ 的前 5 个标志细菌科和属分别是黄色杆菌科（Xanthobacteraceae）、毛螺菌科_UCG_004（Lachnospiraceae_UCG_004）、地嗜皮菌科（Geodermatophilaceae）、肠杆菌科

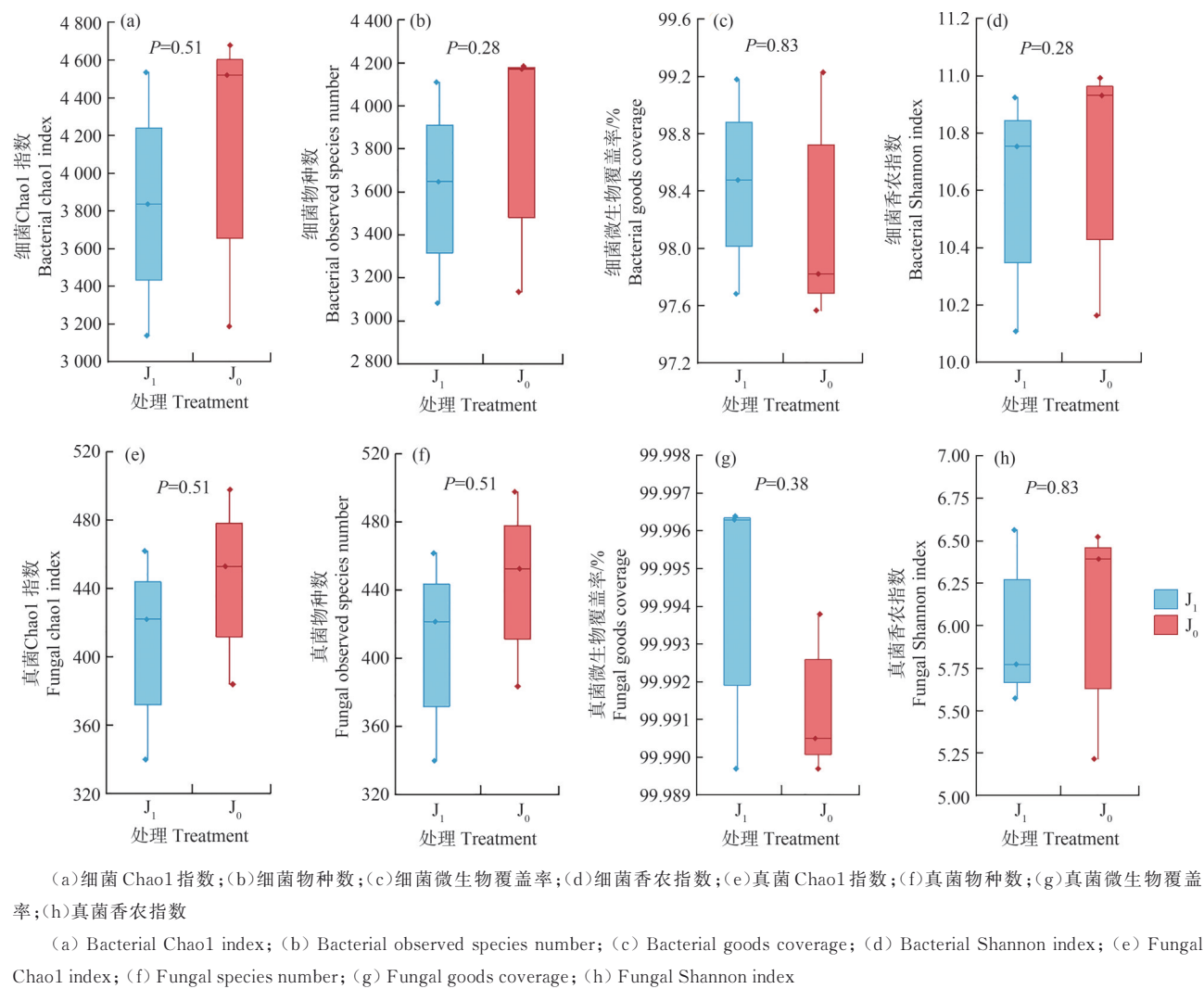


图6 不同处理下土壤微生物多样性箱形图

Fig. 6 Box diagram of soil microbial diversity index under different treatment

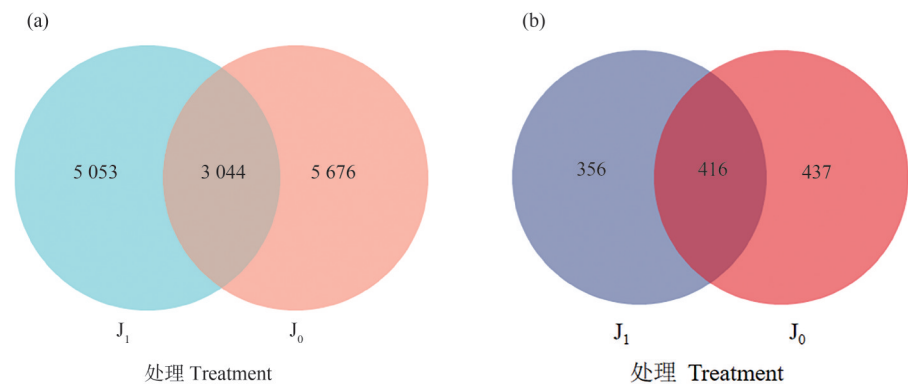


图7 不同处理下土壤样本中细菌(a)和真菌(b)的群落ASV韦恩图

Fig. 7 ASV Venn diagram of bacterial (a) and fungal (b) communities under different treatment

(Enterobacteriaceae) 和 毛螺旋菌属 (*Hyphomonadaceae*); J_1 的前5个标志细菌科和属是假纤细芽孢杆菌属 (*Pseudogracilibacillus*)、芽孢杆菌属 (*Bacillaceae*)、樱桃样芽孢杆菌属 (*Cerasibacillus*)、枝芽孢杆菌属 (*Virgibacillus*) 和 Balneolaceae。

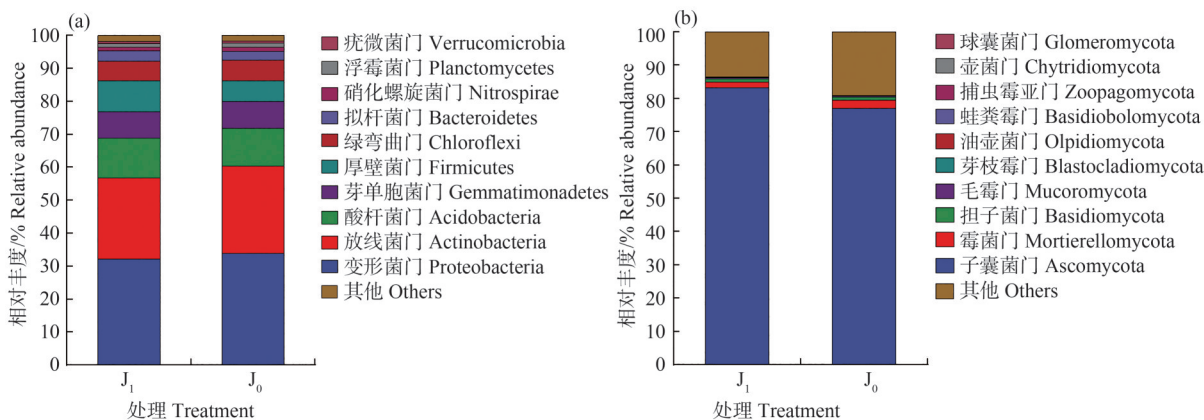
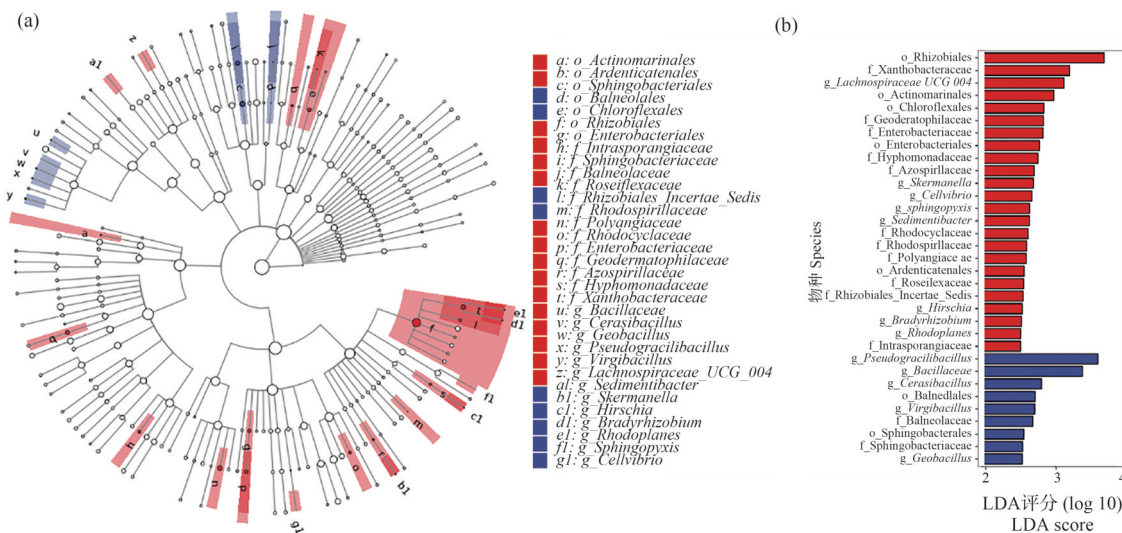


图 8 不同处理下细菌 (a) 和真菌 (b) 群落门水平组成

Fig. 8 Composition of bacterial (a) and fungal (b) community at phylum level under different treatment



LDA 的阈值为 2.5。下同。

The current LDA threshold is 2.5. The same below.

图 9 不同处理下的细菌分类学分支图 (a) 和 LDA 柱形图 (b)

Fig. 9 Bacterial taxonomy branch diagram (a), and LDA histogram (b) under different treatment

J₀的前5个标志真菌科和属是蘑菇属(*Agaricus*)、外瓶霉属(*Exophiala*)、小孢毛壳科(*Herpotrichiellaceae*)、锤舌菌属(*Leohumicola*)和柄孢壳属(*Podospora*)，J₁的前5个标志真菌科和属是曲霉科(*Aspergillaceae*)、曲霉属(*Aspergillus*)、Sordariales_fam_Incertae_Sedis、*Chlamydomyces* 和无孔小囊菌属(*Pithoascus*)，见图10。

3 讨论

3.1 农用酵素对于番茄种子出苗的影响

在番茄生产上，经常会因为种子的发芽势、发芽率不高而造成大量投入的浪费^[23-24]，所以提高种

子发芽率和发芽势既可以节约成本又可以节省时间。本研究初步探索了农用酵素对有机番茄种子发芽的影响，发现在有机番茄发芽过程中利用稀释50×的果蔬和苦参混合农用酵素处理基质与对照相比可以有效提升番茄种子的发芽势和发芽率。其原因可能为农用酵素可打破种皮束缚、提高种子吸水速率^[25]，进而增加种子的发芽率。另外，本试验还针对农场自制育苗基质和商品育苗基质进行了对比试验，结果发现农场自制基质在种子出苗上不及商品育苗基质，但是农用酵素处理后的自制基质与未经处理的商品基质相比，发芽势或是发芽率之间的差距都缩小至2%以内。农场自制的育苗基

可溶性糖含量,提升果实品质,改善风味。主成分分析法和隶属函数法是一种被广泛应用于番茄^[37-38]、梨^[39]、山楂^[40]等不同植物果实品质综合评价的多指标综合评价方法。本研究通过主成分分析和隶属函数综合分析法对4个番茄品质指标进行分析,结果显示用酵素灌溉处理均优于自来水灌溉的对照(J_0),在15 t/hm²有机肥用量的处理下品质最佳。

3.3 农用酵素灌溉对土壤养分及微生物群落结构的影响

本研究中农用酵素能够显著增加土壤有机质含量、总氮含量,提升土壤养分含量,这与韩剑宏等^[8]研究结果一致。同时,在本试验中通过农用酵素灌溉处理(J_1)过的土壤细菌和真菌群落丰富度较对照(J_0)的土壤有所下降,这可能是因为农用酵素中含有大量的有机酸和有益菌^[41],有机酸会抑制大量不适宜酸性环境的杂菌生长,同时农用酵素中的有益菌也能利用有利环境快速繁殖长成优势菌群,导致土壤微生物群落丰富度下降。

在微生物群落的门水平上, J_1 的土壤中酸杆菌门(Acidobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度显著增加,这与李娜^[42]和王帅帅^[43]的研究结果是一致的。酸杆菌门细菌嗜酸,在生态系统中具有重要作用,主要作用是参与植物残体降解^[44]。厚壁菌门是土壤和肠道菌群中有机质降解的核心微生物^[45],能够分解有机物,提高土壤的有机质含量,这解释了 J_1 的土壤有机质含量高于对照(J_0)土壤的现象。同时, J_1 的土壤中变形菌门,放线菌门的相对丰度都下降。变形菌门是细菌中最大的一门,包括很多病原菌,如大肠杆菌、沙门氏菌、幽门螺旋杆菌等常见的种类,但是也有很多可以固氮的细菌^[46]。放线菌主要能促使土壤中的动物和植物遗骸腐烂,可以产生抗菌素,但也包含很多致病菌^[47]。与 J_0 相比, J_1 的土壤中子囊菌门的相对丰度更高。已有研究发现,使用农用酵素浇灌土壤后,子囊菌门在土壤中会呈现出更高的相对丰度^[48]。子囊菌门能够快速代谢植物根际沉积的有机底物,加速土壤碳循环^[49],土壤中相对较高的含氮量能增强其在群落中的优势度^[50],这与本研究的结果相符。

在属水平上, J_1 土壤中的相对丰度增加的细菌群落主要为芽孢杆菌目(Bacillales),包括芽孢杆菌科(Bacillaceae)及其下属的假纤细芽孢杆菌属

(*Pseudogracilibacillus*)等产芽孢微生物;真菌群落中增加的主要是散囊菌目中的曲霉科(Aspergillaceae)。有研究表明,芽孢杆菌科在抑菌^[51]、堆肥^[52]等过程中起到重要作用。值得注意的是, J_0 的土壤中,根瘤目细菌的黄色杆菌科(Xanthobacteraceae)丰度增加。有研究表明,施氮能够降低根瘤菌等解磷细菌的相对丰度,同时增加青霉菌、曲霉菌等解磷真菌的丰度^[53],故推测 J_1 的土壤中总氮含量的升高可能是造成这种现象的原因之一。

4 结 论

番茄栽培过程中应用农用酵素处理可使自制基质的发芽势和发芽率提高26.7%和4.3%($P>0.05$)。施用农用酵素可降低番茄株高、增加茎粗、缩短节间、改善植株株型,提升茎秆的机械抗性,从而促进有机番茄的生长发育。同时,农用酵素可显著增加叶片SPAD,增强叶片光合能力,增加土壤子囊菌门真菌和芽孢杆菌属细菌等微生物丰度,提升土壤有机质和硝态氮含量,促进番茄产量提升和品质改善。综上,施用农用酵素可有效提升有机番茄优质高产的生产效能。

参考文献 References

- [1] 孙永珍, 贺靖, 魏芳, 杨伟健. “十三五”我国番茄产业发展及其国际竞争力评价[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(1): 112-116
Sun Y Z, He J, Wei F, Yang W J. Evaluation on the development and international competitiveness of China's tomato industry during the 13th Five-Year Plan period [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(1): 112-116 (in Chinese)
- [2] 李瑞玲. 苍南县番茄产业的发展策略研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020
Li R L. Study on the development strategy of tomato industry in Cangnan County [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [3] 吕跃强. 温度对温室番茄生长产量和品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021
Lv Y Q. The influence of temperature on the growth, yield and quality of tomato in greenhouse [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [4] 朱凯. 我国中东部有机农场调研及番茄、芦蒿绿色种植体系推广[D]. 南京: 南京农业大学, 2018
Zhu K. Investigation of organic farms central and eastern China and promotion of green planting system of tomato and artemisia [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [5] Zhang Y H, Zheng Z H, Meng X Y, Cai Y F, Liu J B, Hu Y G, Yan S D, Wang X F. A microbial ecosystem: Agricultural Jiaosu achieves

- effective and lasting antifungal activity against *Botrytis cinerea* [J/OL]. *Applied Microbiology and Biotechnology Express*, (2020-12-14). DOI: 10.1186/s13568-020-01156-7
- [6] 张越, 王小芬. 农用植物酵素在有机农业生产中的生态作用[J]. 鄱阳湖学刊, 2019, (1):70-74,125-126
- Zhang Y, Wang X F. Ecological effect of plant Jiaosu for agriculture in organic agricultural production[J]. *Journal of Poyang Lake*, 2019, (1): 70-74,125-126 (in Chinese)
- [7] Kaari M, Manikkam R, Annamalai K K, Joseph J. *Actinobacteria* as a source of biofertilizer/biocontrol agents for bio-organic agriculture [J/OL]. *Journal of Applied Microbiology*, (2022-12-16) DOI: 10.1093/jambio/txac047
- [8] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 李玉梅, 姜庆宏, 王维大. 生物炭和环保酵素对盐碱化土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):1029-1036
- Han J H, Liu Z X, Zhang L K, Li Y M, Jiang Q H, Wang W D. Effects of biochar and environmental enzymes on the characteristics of salinized soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(5): 1029-1036 (in Chinese)
- [9] 杨园媛, 贾圣青, 杨辉, 张明科. 土壤调理剂与酵素施用对土壤理化性质及甘蓝产量的影响[J]. 蔬菜, 2020, (2): 14-19
- Yang Y Y, Jia S Q, Yang H, Zhang M K. Effects of soil conditioners and enzymes application on soil physical and chemical properties and yield of cabbage[J]. *Vegetables*, 2020, (2): 14-19 (in Chinese)
- [10] 沈奕, 赏莹莹. 复合酵素和生物炭配施对番茄生长发育和产量、品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5):133-135
- Shen Y, Shang Y Y. The effects of combined application of composite enzymes and biochar on the growth, development, yield, and quality of tomato [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(5): 133-135 (in Chinese)
- [11] 韩亚萍. 硒与酵素混施对番茄与菠菜生长及品质的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020
- Han Y P. Effect of selenium mixed with enzymes on growth and quality of tomato and spinach [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [12] 朱丽梅, 刘艳芝, 王淑霞, 徐祥文, 马井玉. 环保酵素防治3种蔬菜病害的初步研究[J]. 中国园艺文摘, 2017, 33(5):40-41
- Zhu L M, Liu Y Z, Wang S X, Xu X W, Ma J Y. Preliminary study on the prevention and control of three vegetable diseases with environmental protection enzymes[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, 33(5):40-41 (in Chinese)
- [13] 刘艳娜, 崔楠楠, 张杰, 于凤鸣, 张立彬, 姚允聪. 芳香植物源营养液对梨树的抑菌和营养效应[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19):3981-3990
- Liu Y N, Cui N N, Zhang J, Yu F M, Zhang L B, Yao Y C. Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on inhibition of harmful bacteria and nutrition for pear plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(19):3981-3990 (in Chinese)
- [14] 杨淑华, 梁进秋, 李腊平, 贾利芳, 王丽丽. 大同地区近50年来气温突变的诊断分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31:32-34
- Yang S H, Liang J Q, Li L P, Jia L F, Wang L L. Diagnostic analysis of temperature mutation during the recent 50 years in Datong region [J]. *Chinese Journal of Agrameteorology*, 2010, 31:32-34 (in Chinese)
- [15] 滕秀兰, 蒲陆梅, 王兴民. 分光光度法测定番茄红素[J]. 理化检验:化学分册, 2013, 49(11):1385-1386,1388
- Teng X L, Pu L M, Wang X M. Determination of lycopene by spectrophotometry[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2013, 49(11):1385-1386,1388 (in Chinese)
- [16] 李瑞, 牛晓丽, 周振江, 王旭东, 胡田田. 分根区交替灌溉条件下水肥供应对番茄可溶性糖含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(3):124-132
- Li R, Niu X L, Zhou Z J, Wang X D, Hu T T. Effects of water and fertilizers on tomato soluble sugar contents under alternate partial root-zone irrigation [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2013, 41(3):124-132 (in Chinese)
- [17] 程露, 项阳, 逢洪波, 职铭阳, 赵宗耀, 金明, 陈强, 郑晓明. 水稻苗期耐冷种质资源筛选及耐冷性综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 34-45
- Cheng L, Xiang Y, Pang H B, Zhi M Y, Zhao Z Y, Jin M, Chen Q, Zheng X M. Screening and comprehensive evaluation of cold-tolerant germplasm resources at rice seedling stage [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2):34-45 (in Chinese)
- [18] 王敏. 碱熔—火焰光度法测定土壤全钾应注意的问题[J]. 辽宁林业科技, 2016, (6):75-76
- Wang M. Problems needing attention in the determination of total potassium in soil by alkali fusion-flame spectrophotometry[J]. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2016, (6):75-76 (in Chinese)
- [19] 陈元松, 侯明韬, 马丹, 韩雪红, 张瑞艳, 张雪中. 碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤中总磷[J]. 中国标准化, 2018, (S1):193-196
- Chen Y S, Hou M T, Ma D, Han X H, Zhang R Y, Zhang X Z. Determination of total phosphorus in soil by alkali fusion- molybdenum antimony anti-spectrophotometry [J]. *China Standardization*, 2018, (S1):193-196 (in Chinese)
- [20] 刘晶晶. 土壤中铵态氮测定方法探讨[J]. 当代化工, 2022, 51(6):1509-1512
- Liu J J. Determination method of ammonium nitrogen in soil [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(6):1509-1512 (in Chinese)
- [21] 徐晓荣, 李恒辉, 陈良. 还原蒸馏法与酚二磺酸比色法测定土壤硝态氮的比较[J]. 核农学通报, 1997, (2):33-35
- Xu X R, Li H H, Chen L. Comparison of reducing distillation and phenoldisulfonic acid colorimetry in determining nitrate nitrogen in soil [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 1997, (2): 33-35 (in Chinese)
- [22] 张少彬, 冯钟钟. 重铬酸钾容量法测定广东省部分地区土壤中有机质含量的研究[J]. 广东化工, 2023, 50(4):189-191,213
- Zhang S B, Feng Z Z. Study on determination of organic matter content in soil in some areas of Guangdong province by potassium dichromate volumetric method [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(4): 189-191,213 (in Chinese)
- [23] 周其宇. 不同引发剂对番茄、茄子种子萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(8):947-951
- Zhou Q Y. Effects of different initiators on seeds germination of eggplant and tomato [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(8): 947-951 (in Chinese)
- [24] 李信云, 蒋舒蕊, 李静, 赵凯. 三种新型肥料对番茄种子萌发的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(9):71-75
- Li X Y, Jiang S R, Li J, Zhao K. Effects of three new fertilizers on tomato seed germination [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2022, 42(9): 71-75 (in Chinese)
- [25] 张越. 农用酵素发酵特性及其在作物-土壤系统中的生态效应机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2021
- Zhang Y. The fermentation characteristics of agricultural Jiaosu and its ecological effects in the crop-soil system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021 (in Chinese)

- [26] 闫冰洁, 邓子萱, 王一贺, 任文卓, 李俊阳, 南松剑. 施用环保酵素对松柳芽苗菜生长与品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(7):73-79
Yan B J, Deng Z X, Wang Y H, Ren W Z, Li J Y, Nan S J. Effects of application of garbage enzyme on the growth and quality of pine willow sprouts [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, 62 (7) : 73-79 (in Chinese)
- [27] 谢育利, 邓秀泉, 李楠, 王吉平, 唐芳玉, 罗增桂, 苏天明. 植物酵素对茄子产量及品质的影响[J]. 江西农业学报, 2023, 35(6):49-53
Xie Y L, Deng X Q, Li N, Wang J P, Tang F Y, Luo Z G, Su T M. Effects of plant enzymes on yield and quality of eggplant [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(6):49-53 (in Chinese)
- [28] 王宇, 李浩, 姚珍珠, 廖祺, 杜太生. 水分和盐分胁迫对番茄植株生长和木质部水力特性的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1):114-122
Wang Y, Li H, Yao Z Z, Liao Q, Du T S. Effects of water and salt stresses on plant growth and xylem hydraulic properties of tomato [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(1) : 114-122 (in Chinese)
- [29] Yang X C, Hwa C M. Genetic modification of plant architecture and variety improvement in rice[J]. *Heredity*, 2008, 101(5): 396-404
- [30] 缪卫国, 范咏梅, 马俊义, 马晓平, 赵利新, 魏东, 孙家煜. 酵素菌对主要温室蔬菜的促生和抗病作用[J]. 新疆农业科学, 2000, 37(6): 273-274
Miu W G, Fan Y M, Ma J Y, Ma X P, Zhao L X, Wei D, Sun J Y. Effect on BYM to growth and disease control of important vegetables in greenhouse [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2000, 37(6) : 273-274 (in Chinese)
- [31] 封顺, 张旭龙, 王吉德. 矮壮素和缩节胺分析方法进展[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(10): 2091-2096
Feng S, Zhang X L, Wang J D. Progress of analytical method of determination of chlormequat chloride and mepiquant chloride [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(10): 2091-2096 (in Chinese)
- [32] 王薇, 宋廷宇, 王艳, 董晓涛, 柴晶, 薛英. 番茄叶片SPAD值与叶绿素含量的相关性分析[J]. 北方园艺, 2013(23): 12-15
Wang W, Song T Y, Wang Y, Dong X T, Chai J, Xue Y. Correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves [J]. *Northern Horticulture*, 2013(23): 12-15 (in Chinese)
- [33] 刘希港, 李楠, 季托, 周波, 魏琨, 李静, 杨凤娟. 微生物菌剂和玉米蛋白酵素对番茄叶片生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3039-3044
Liu X G, Li N, Ji T, Zhou B, Wei M, Li J, Yang F J. Effects of microbial agents and corn protein ferment on physiological characteristics in leaves and yield of tomato [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11) : 3039-3044 (in Chinese)
- [34] 陈财志, 李水凤, 周东, 权新华, 黄鹂. 生物酵素叶面肥对普通白菜产量和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2023(3): 57-64
Chen C Z, Li S F, Zhou D, Quan X H, Huang L. Effects of applying enzyme foliar fertilizer on pakchoi yield and quality [J]. *China Vegetables*, 2023(3): 57-64 (in Chinese)
- [35] 陈小慧, 高飞, 韩宝, 聂青, 许鹤鸣, 周孝秋, 曲明山. 不同肥料配施对番茄品质及土壤养分的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(6): 67-73
Chen X H, Gao F, Han B, Nie Q, Xu H M, Zhou X Q, Qu M S. Effects of different fertilizers application on tomato quality and soil nutrient [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2022, 42(6): 67-73 (in Chinese)
- [36] 张向梅, 乔凯, 高艳明, 李建设. 7种鲜食高品质番茄果实发育与产量品质比较[J]. 西北农业学报, 2019, 28(3): 433-439
Zhang X M, Qiao K, Gao Y M, Li J S. Comparison of fruit development, yield and quality seven fresh and high-quality tomato varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(3): 433-439 (in Chinese)
- [37] 蔡润, 孙正梁, 胡京昂, 宫海军, 张颜. 不同口感型番茄品种的品质鉴定及多元统计分析[J]. 中国蔬菜, 2023(11): 87-97
Cai R, Sun Z L, Hu J A, Gong H J, Zhang Y. Quality identification and multivariate statistical analysis of different palatable tomato varieties [J]. *China Vegetables*, 2023(11): 87-97 (in Chinese)
- [38] 王文选, 季延海, 刘明池, 武占会, 梁浩, 王丽萍, 王素娜. 不同鲜食番茄品种生长和品质综合分析[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2023, 43(5): 39-50
Wang W X, Ji Y H, Liu M C, Wu Z H, Liang H, Wang L P, Wang S N. Comprehensive analysis of growth and quality of different fresh tomato varieties [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2023, 43(5):39-50 (in Chinese)
- [39] 殷益明, 丁福全, 史星雲, 王莉, 徐珊珊. ‘黄冠梨’果实品质主成分分析与综合评价[J]. 果树资源学报, 2023, 4(6):6-9
Yin Y M, Ding F Q, Shi X Y, Wang L, Xu S S. Principal component analysis and comprehensive evaluation on the fruit quality of ‘Huangguan’ pear [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2023, 4(6) : 6-9 (in Chinese)
- [40] 郭晓雨, 张吉军, 王昊, 朱京涛. 基于主成分分析和聚类分析的软核山楂果实品质综合评价[J]. 河北科技师范学院学报, 2023, 37(3):7-14
Guo X Y, Zhang J J, Wang H, Zhu J T. Comprehensive evaluation of fruit quality of soft-endocarp hawthorn fruit quality based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2023, 37(3):7-14 (in Chinese)
- [41] Gao Y H, Zhang Y, Cheng X Q, Zheng Z H, Wu X H, Dong X H, Hu Y G, Wang X F. Agricultural Jiaosu: An eco-friendly and cost-effective control strategy for suppressing fusarium root rot disease in *Astragalus membranaceus* [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, (2022-03-31). DOI: 10.3389/fmicb.2022.823704
- [42] 李娜. 巨大芽孢杆菌TA-4的分离鉴定及其生物有机肥对番茄生长和土壤微生物群落的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020
Li N. Isolation and identification of *Bacillus megaterium* TA-4 and effects of its bio-organic fertilizer on tomato growth and soil microbial community [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [43] 王帅帅. 饼肥对番茄植株根际土壤生物学特性和微生物多样性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020
Wang S S. Effects of cake fertilizer on rhizospheric biological characteristics and microbial diversity of tomato rhizosphere soil [D]. Nanning: Guangxi University, 2020 (in Chinese)
- [44] 王光华, 刘俊杰, 于镇华, 王新珍, 金剑, 刘晓冰. 土壤酸杆菌门细菌生态学研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(2): 14-20
Wang G H, Liu J J, Yu Z H, Wang X Z, Jin J, Liu X B. Research progress of Acidobacteria ecology in soils [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, 32(2): 14-20 (in Chinese)
- [45] 黄俊杰, 陆雅海. 土壤拟杆菌与梭菌分解多糖类有机物质的研究进展与展望[J]. 微生物学通报, 2022, 49(3): 1147-1157
Huang J J, Lu Y H. Decomposition of soil polymeric organic matter by *Bacteroidetes* and *Clostridia*: Progress and perspectives [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(3): 1147-1157 (in Chinese)
- [46] 袁凯倪. 养分输入对白洋淀水质的影响及微生物群落的特征分析[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022
Yuan K N. Effects of nutrient inputs on water quality and characteristic analysis of microbial community in Baiyangdian wetland [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022 (in Chinese)

- [47] 王妙玲. 桉树单宁对土壤呼吸及微生物群落结构的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2022
- Wang M L. Effects of eucalyptus tannins on soil respiration and microbial community structure [D]. Nanning: Guangxi University, 2022 (in Chinese)
- [48] Wei X M, Cao P, Wang G, Han J P. Microbial inoculant and garbage enzyme reduced cadmium (Cd) uptake in *Salvia miltiorrhiza* (Bge) under Cd stress [J/OL]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, (2020-02-13). DOI:doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110311
- [49] 张毅, 杨文浩, 周碧青, 杨静, 邢世和. 炭基肥对酸化茶园土壤细菌和真菌数量及群落结构的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2023, 52(2): 247-257
- Zhang Y, Yang W H, Zhou B Q, Yang J, Xing S H. Effect of biochar-based fertilizer on soil bacteria and fungi quantity and community structure in acidified tea garden [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2023, 52(2): 247-257 (in Chinese)
- [50] Zhou J, Jiang X, Zhou B K, Zhao B S, Ma M C, Guan D W, Li J, Chen S F, Cao F M, Shen D L, Qin J. Thirty four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and alters fungal community composition in black soil in Northeast China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 135-143
- [51] 黄伟, 张丽娟, 王宁, 王玮. 芽孢杆菌属挥发性物质及其在植物病害防治中的应用研究进展[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(9): 30-36
- Huang W, Zhang L J, Wang N, Wang W. Research progress and application of *Bacillus* spp volatile organic compounds in plant disease control [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41(9): 30-36 (in Chinese)
- [52] 赵阳阳, 刘银双, 牛宏进, 贾振华, 李再兴, 陈晓波, 黄亚丽. 鸡粪好氧堆肥过程中细菌群落结构和功能分析[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 1175-1187
- Zhao Y Y, Liu Y S, Niu H J, Jia Z H, Li Z X, Chen X B, Huang Y L. The structure and function analysis of bacterial community during aerobic composting of chicken manure [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2023, 39(3): 1175-1187 (in Chinese)
- [53] 夏允, 徐玲琳, 杨柳明, 杨智杰, 范跃新, 杨玉盛. 模拟氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤解磷微生物群落和功能潜力的影响[J/OL]. 生态学报, (2023-11-29). <http://10.20103/j.stxb.202303210543>
- Xia Y, Xu L L, Yang L M, Yang Z J, Fan Y X, Yang Y S. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microbial community and functional potential otphosphate-solubilizing microorganisms in a subtropical *Castanopsis carlesii* forest. [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, (2023-11-29). <http://10.20103/j.stxb.202303210543> (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 刘宇, 中国农业大学农学院硕士研究生, 专业为农艺与种业。2023年获得中国农业大学校级硕士二等学业奖学金、新长城助农奖学金和农学院三好学生, 参与国家重点研发计划(2021YFD1901103)。



通讯作者简介: 高游慧, 中国农业大学农学院博士后。研究方向: 有机农业栽培技术及农业废弃物资源转化。曾获第八届中国国际互联网+大学生创新创业大赛北京市一等奖, 中国农业大学“社会服务卓越贡献奖”, 中国农业大学“崇农尚美”敏聪乡村振兴奖学金等多项荣誉。在 *Frontiers in Microbiology*、*Environment Research*、《中国农业大学学报》《中国生态农业学报(中英文)》等期刊发表论文5篇, 发布山西省省级地方标准1项, 参编专著1部。