

畜禽粪便有机肥制备及其对土壤营养 和西红柿品质的影响

李涛^{1,2}, 仲惟^{1,2}, 赵君^{1,2}, 刘欢龙^{1,2}, 李立军^{1,2}

(1.河南科技大学 应用工程学院, 河南 三门峡 472000; 2.三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

摘要:以畜禽养殖粪便为主要原料,以玉米秸秆糠为调理剂,通过生物+纳米复合分子膜静态堆肥分别生产出符合标准 NY 884—2021 的品质优良有机肥(OF)产品及生物有机肥(BOF)。设计5组平行西红柿栽培试验,即CK组(不施肥)、CF组(100% 硫酸钾型复合肥, 400 kg/hm²)、COF组(80% 硫酸钾型复合肥+20%OF 3 000 kg/hm²)、CBO组(80% 硫酸钾型复合肥+20%BOF 3 000 kg/hm²)、COB组(70% 硫酸钾型复合肥+20%OF 2 000 kg/hm²+10%BOF 1 000 kg/hm²)5种施肥方式,试验结束后进行土壤有机质、全氮、速效钾等养分质量分数及果实品质指标,如可溶性糖、维生素C质量分数等的测定。结果发现:配施有机肥可使土壤中的速效氮、磷、钾相对提高,且化肥减施20%~30%对番茄产量影响不大。有机无机配施与单施化肥相比可显著提高果实品质,如提高可溶性糖和维生素C质量分数的同时有效降低可滴定酸及硝酸盐的质量分数($p<0.05$)。通过对土壤耕层理化指标影响主成分进行分析,发现各施肥方式对土壤耕层理化指标影响由大到小排序依次为:CBO、COB、COF、CK、CF。采用冗余分析对土壤耕层理化指标与番茄品质相关性进行分析,发现土壤耕层6个理化指标均与番茄品质显著相关。

关键词:有机肥;生物有机肥;理化指标;主成分分析;冗余分析

中图分类号:S-3 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2024)03-0048-07

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Preparation of organic fertilizer from livestock manure and its effects on soil nutrition and tomato quality

LI Tao^{1,2}, ZHONG Wei^{1,2}, ZHAO Jun^{1,2}, LIU Huanlong^{1,2}, LI Lijun^{1,2}

(1.College of Applied Engineering, Henan University of Science and Technology, Sanmenxia 472000, China;
2.Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: Using livestock and poultry manure as the main raw material and corn straw bran as the conditioner, organic fertilizer (OF) and bio-organic fertilizer (BOF) products were produced by biological nano-composite molecular film static composting, and all products were in line with standards of NY 884—2021. Five parallel tomato cultivation experiments were designed, namely, CK (no fertilizer), CF (100% potassium sulfate compound fertilizer, 400 kg/hm²), COF (80% potassium sulfate compound fertilizer+20%OF 3 000 kg/hm²), CBO (80% potassium sulfate compound fertilizer+20%BOF 3 000 kg/hm²), COB (70% potassium sulfate compound fertilizer+20%OF 2 000 kg/hm²+10%BOF 1 000 kg/hm²). After the experiment, soil organic matter, total nitrogen, available potassium and other nutrient quality fractions and fruit quality indicators, such as soluble sugar and vitamin C quality fraction, were determined. The results showed that the application of organic fertilizer could increase the relative content of available nitrogen, phosphorus and potassium in the soil, and the reduction of chemical fertilizer by 20%~30% had little effect on tomato yield. The application of organic and inorganic fertilizer compared with the application of chemical fertilizer alone could significantly improve the fruit quality, such as increasing the soluble sugar and vitamin C quality fraction while effectively reducing the titratable acid and nitrate quality fraction ($p<0.05$). Through the principal component analysis of the physical and chemical indicators of the soil tillage layer, it was found that the effect of different fertilization methods on the physical and chemical indicators of the soil tillage layer was ranked from large to small as follows: CBO, COB, COF, CK, CF. Redundancy analysis was used to analyze the correlation between the physical and chemical indicators of the soil tillage layer and tomato quality, and it was found that the 6 physical and chemical indicators of the soil tillage layer were significantly correlated with tomato quality.

收稿日期:2023-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32200089);河南省科技攻关项目(222102110198)

作者简介:李涛,女,博士,副教授,研究方向为农业生物技术及微生物-宿主-环境互作。E-mail:litao83929@163.com

and COB (70% potassium sulfate compound fertilizer+20%OF 2 000 kg/hm²+10%BOF 1 000 kg/hm²). After the experiment, the nutrient contents of soil, organic matter, total nitrogen, and available potassium, as well as fruit quality indicators such as soluble sugar and vitamin C content were measured. The results showed that the application of organic fertilizer could relatively increase the available nitrogen, phosphorus, and potassium in the soil, and reducing chemical fertilizer application by 20% to 30% had little effect on tomato yield. Compared to the single application of chemical fertilizer, the combined application of organic and inorganic fertilizers could significantly improve fruit quality, such as increasing soluble sugar and vitamin C content while effectively reducing the content of titratable acid and nitrate ($p<0.05$). Through the analysis of the main component of the impact of soil physicochemical indicators on the soil layer, it was found that the impact of each fertilization method on the soil physicochemical indicators was ranked as follows: CBO, COB, COF, CK, and CF. The correlation between six physicochemical indicators in the soil layer and tomato quality was analyzed by redundancy analysis and it was found that all six physicochemical indicators in the soil layer were significantly correlated with tomato quality ($p<0.05$).

Key words : organic fertilizer; biological organic fertilizer; physicochemical indicators; principal component analysis; redundancy analysis

化肥因其施用方便、肥效快且增产效果明显,在农业生产中发挥着至关重要的作用,然而长期大量施用化肥会降低土壤有机质含量,引发土壤理化性状恶化、营养功能衰减^[1]。之前已有大量国内外研究发现有机肥在改良土壤、培肥地力、增产及提升作物品质上作用显著^[2-4]。近期很多研究证实,化肥与有机肥合理配施可改善土壤微生物群落结构,改良土壤养分性状,有效提高农产品产量和品质,从而提高化肥利用效率,减少化肥用量^[5-6]。从农业废弃物高效利用和维护农田地力的角度出发,有机无机配施将是我国今后肥料施用发展的必然趋势。

随着强农惠农政策的实施,大型牲畜及家禽养殖量将呈现稳步上升趋势,伴随而来的畜禽养殖产业污染物产生量大、污染负荷高、处理难度大,亦成为我国重要的农业面污染源之一。畜禽粪便中富含大量有机质,包括蛋白质及碳水化合物,在无氧条件下可分解产生氨气、硫化氢等有毒气体及甲烷、二氧化碳等温室气体^[7]。其中大量有害微生物、病原菌及寄生虫卵,易对土壤及水体环境造成污染。

堆肥技术具有对粪污无害化处理比较彻底、粪便附加值高、经济效益好等优点,是目前应用较广的畜禽粪便处理模式。Huang 等^[8]研究发现,采用强制通风和机械堆翻相结合的方式有利于水溶碳的分解和固相碳氮比的降低,加快堆肥腐熟。刘世亮等^[9]研究指出,随畜禽粪便有机肥施用量增加,小麦土壤中的碱解氮、速效钾和速效磷、有机质和活性有机质质量分数显著增加,而化学氮肥施用量增加,仅增加土壤碱解氮质量分数,对土壤速效钾、速效磷和有机质质量分数的影响不明显。王玉军等^[10]研究指出,添加微生物菌剂处理鸡粪和玉米秸秆混合有机物料,不仅加快了分解速度,而且促进了氮的积累,比未添加菌剂处理的氮质量分数增加了 5.4%。Shen 等^[11]研究发现随着植株连作的增加,土壤细菌群落多样性和丰富度下降,真菌群落多样性和丰富度增加,施用生物有机肥导致土壤根际细菌和放线菌数量显著增加,土壤真菌数量显著减少。前人对畜禽粪便为主料的堆肥产品的肥效及其微生物群落结构进行了探讨,但综合土壤理化指标、微生物多样性及土壤营养状况互作分析的文献较少,本项目主要开展此系统研究。

本研究选取畜禽养殖粪便及秸秆等农业废弃物为主要原料和调理剂,采用生物+纳米复合分子膜静态堆肥技术,生产出高于传统发酵模式的品质优良的有机肥(OF)产品,并添加功效菌种开发复配出生物有机肥(BOF)。将 OF 及 BOF 复配常规化肥,设计若干配施比例开展西红柿栽培试验,进行土壤有机质、全氮、速效钾等养分含量及果实品质指标,如可溶性糖、可溶性蛋白质、维生素 C 含量等进行测定,分析不同有机无机肥配施对果实品质和土壤营养状况的影响,为农业生产力提高及养分资源高效利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试植物及试验地点

选择供试植物为番茄,品名为粉都金冠王,购自河南豫艺种业科技发展有限公司。

试验地点位于三门峡市湖滨区富村千亩蔬菜基地(北纬 34°43′15.41″、东经 111°14′20.30″)。土壤类型为褐土,尤其以半淋溶型壤质土居多,有机质和全氮质量分数均较低,有机质质量分数约为 10~20 g/kg,全氮质量分数约 0.4~1.0 g/kg,碱解氮质量分数约 40~60 mg/kg。由于土壤中 Ca 离子呈饱和状态,P 多与 Ca 结合而被固定,导致其中速效磷含量也较低。另该地区微量元素 Zn、Mn、Fe、B 等有效态含量亦较低。

1.2 供试有机肥及生物有机肥制备

1.2.1 堆肥原料成分分析、重金属含量测定

参照有机肥料(NY/T 525—2021)标准^[12]中的相应方法测定畜禽粪便含水率、pH、有机质质量分数、总氮质量分数、总磷质量分数、总钾质量分数等,尤其对其中的砷、汞、铅、铬、镉的限量(以烘干基计,mg/kg)数值进行测定,确保原料无重金属污染方可用于堆肥试验。

1.2.2 生物+纳米复合分子膜静态堆肥

选取三门峡养殖产业畜禽养殖粪便为主要原料,以玉米秸秆糠为调理剂,经过物料碳氮比计算最终确定原料质量配比为 $m(\text{畜禽粪便}):m(\text{玉米秸秆糠})=3:1$,另外在体系中添加质量分数为 0.5%石灰作为重金属钝化剂,质量分数为 0.03% 的茶皂素作为病原菌拮抗剂。采用具有分子过滤微孔结构的纳米复合分子膜(24 h 透湿量为 8 000 g/m²,透气率为 2 L/(m²·s⁻¹))构建的密闭发酵系统,配备智能控制系统调节发酵温度约 65 ℃,底部安装曝气系统以稳定氧气体积分数约为 13%,堆体中添加质量分数为 3‰ 高效发酵混合菌剂(包含光合菌、酵母菌、乳酸菌、放线菌、芽孢杆菌等,购自天津 ETS 生物科技,执行标准 GB 20287—2006^[13]),高温快速发酵约 15 d 后停止供氧进行陈化腐熟,持续发酵约 10 d 至腐熟完全,即得符合农业部行业标准 NY 884—2021 的品质优良的有机肥(OF)产品^[14]。

1.2.3 供试生物有机肥制备

将上述发酵好的有机物料粉碎、过筛,在发酵好的有机肥中添加购自湖北启明生物工程有限公司质量分数为 2‰ 的复合功效菌剂(枯草芽孢杆菌、哈茨木霉菌等,执行标准 GB 20287—2006^[13])混合均匀,即得生物有机肥产品(BOF),枯草芽孢杆菌活菌数 $\geq 4.00\times 10^{10}$ g⁻¹,哈茨木霉菌活菌数 $\geq 1.00\times 10^9$ g⁻¹。

1.3 西红柿栽培试验设计

1.3.1 供试肥料

化肥采用硫酸钾型复合肥(N、P₂O₅、K₂O 质量比为 15:15:15,总养分 $\geq 45\%$),有机肥(OF)及生物有机肥(BOF)为本研究中所制备产品。所制备有机肥及生物有机肥有机质质量分数 $\geq 35\%$ 、氮磷钾质量分数 $\geq 5\%$,复合功效菌剂有效活菌数 $\geq 0.5\times 10^8$ g⁻¹。

1.3.2 试验设计

共设计 5 组平行试验:(1)CK 组(不施肥);(2)CF 组(100% 硫酸钾型复合肥,400 kg/hm²);(3)COF 组(80% 硫酸钾型复合肥+20%OF 3 000 kg/hm²);(4)CBO 组(80% 硫酸钾型复合肥+20%BOF 3 000 kg/hm²);(5)COB 组(70%硫酸钾型复合肥+20%OF 2 000 kg/hm²+10%BOF 1 000 kg/hm²)。

小区面积 9.0 m²(1.0 m×9.0 m),每组试验 6 次重复,随机区组排列,采用起垄方式进行种植,垄高约 0.3 m,植株间距 0.3 m。各小区周边设置田埂(宽 50 cm,高 20 cm)将相邻小区隔开。OF、BOF 在土壤翻耕时期基施,硫酸钾型复合肥以条沟状施肥,第一穗果膨大到鸡蛋大小时可进行一次硫酸钾型复合肥追肥,结合灌水采用浅穴沟施。于 2022 年 5 月上旬播种,定期观察和记录番茄生长情况,试验结束后,番茄成熟期进行土壤养分含量及果实中硝酸盐、可溶性固形物、可溶性糖及维生素 C 等指标测定。

1.4 土壤样本测定方法

pH 测定采用电位法;土壤有机质(OM)采用重铬酸钾外加热容量法测定;土壤全氮(TN)采用半微量凯氏法(KSO₄-CuSO₄-Se 蒸馏法)测定;土壤速效钾(AK)采用火焰光度法 1 mol/L NH₄AcO 提取测定;土壤有效磷(AP)采用钼锑抗比色法 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取测定;土壤碱解氮(AHN)的测定采用扩散吸收法。

番茄可溶性糖采用蒽酮法,可滴定酸采用碱溶液滴定法,糖酸比为可溶性糖含量与可滴定酸含量比值;维生素 C 采用 2,6-二酚靛酚滴定比色法;硝酸盐则采用浓硫酸-水杨酸比色法进行测定。

1.5 数据分析及统计

采用 Microsoft Excel 进行数据整理,用 SPSS 21. 0 软件进行数据方差分析(Duncan 检验法)及主成分分析,差异显著性水平设为 $p=0.05$ 。土壤耕层理化指标与番茄品质相关性冗余分析采用图图云平台 <https://www.cloudtutu.com/#/login> 在线分析。

2 结果及分析

2.1 堆肥原料成分及重金属含量分析

对畜禽粪便理化指标进行检测,检测结果如表 1 所示,畜禽粪便中营养成分质量分数较高且 5 项重金属检测均未超出国标 GB 15618—2018 规定的农用地土壤污染风险筛选值^[15],可用作堆肥原料。

表 1 畜禽粪便各理化指标检测

Table 1 Detection of physicochemical indicators of livestock and manure

含水率/%	pH	$w(\text{有机碳})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{氮})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{磷})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{钾})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
68.4	7.62	426.31	23.78	18.20	15.36
$w(\text{汞})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{砷})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{铅})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{铬})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{铜})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	
0.03	12.34	3.51	56.4	10.65	

2.2 不同施肥方式对土壤耕层理化指标的影响

由表 2 可以看到,试验地块 pH 呈弱碱性,CF 处理使得土壤 pH 下降 0.44,有明显酸化趋势,COF、CBO 及 COB 处理对土壤 pH 影响不大,与 CK 间无显著性差异($p<0.05$)。土壤有机质是植物营养的主要来源之一,在一定含量范围内,其含量与土壤肥力水平呈现正相关,施用有机肥使得土壤中有机质含量均有不同程度的增加,尤其 COF 处理增加最为显著,其次是 CBO 处理,CF 处理则使得土壤有机质含量下降($p<0.05$)。土壤全氮代表氮素总贮量及供氮能力,碱解氮则为速效氮,反映土壤近期的氮素供应能力,有机无机配施使得土壤中的全氮及碱解氮质量分数均显著高于 CK 和 CF 处理,COF 处理土壤的全氮质量分数最高,比 CK 高出 0.64 g/kg,CBO 处理土壤中碱解氮质量分数相比 CK 增加最为明显,为 64.89 g/kg($p<0.05$)。化肥减量增施有机肥及生物有机肥使土壤中速效养分增加显著,尤其 CBO 处理土壤的速效钾质量分数增加 9.47 g/kg,COB 处理土壤的有效磷质量分数增加 21.25 g/kg($p<0.05$),表明有机肥促进磷和钾的转化,从而增加土壤中钾肥和磷肥的利用率。

表 2 不同施肥方式对土壤耕层理化指标的影响

Table 2 Effects of different fertilization methods on physicochemical indicators of soil surface

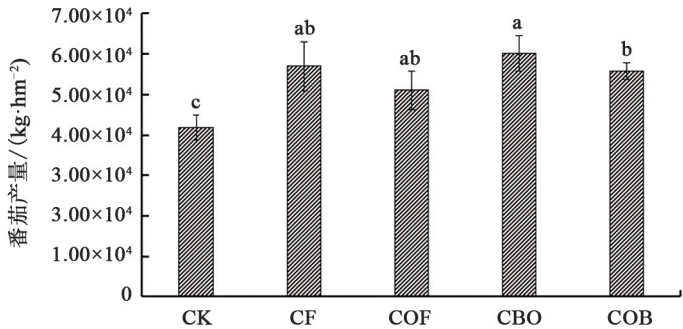
不同施肥方式	pH	$w(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{速效钾})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{有效磷})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全氮})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{碱解氮})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
CK	7.62±0.08 ^a	10.61±0.18 ^c	129.69±4.80 ^b	13.39±0.67 ^d	0.99±0.06 ^c	93.50±4.84 ^d
CF	7.18±0.04 ^b	10.23±0.17 ^d	118.81±3.29 ^c	21.12±0.86 ^c	1.37±0.03 ^b	132.05±3.11 ^c
COF	7.52±0.03 ^b	13.54±0.14 ^a	135.54±4.77 ^{ab}	27.38±2.12 ^b	1.63±0.05 ^a	153.56±3.29 ^{ab}
CBO	7.58±0.08 ^b	13.25±0.29 ^{ab}	139.16±3.36 ^a	30.18±0.64 ^b	1.39±0.03 ^b	158.39±2.09 ^a
COB	7.54±0.03 ^b	13.06±0.10 ^b	130.95±2.87 ^b	34.74±2.40 ^a	1.57±0.11 ^a	148.45±1.99 ^b

注:表中 a、b、c、d 表示各处理间的差异显著程度($p<0.05$)。

2.3 不同施肥方式对番茄产量的影响

图 1 中可以看到,CF 处理与 CK 相比番茄产量提高显著,COF 与 CF 处理间差距不明显,COB 处理比 COF 和 CF 处理所得番茄产量差异不显著,CBO 处理所得番茄产量最高,且与 COB 和 CK 间差异显著($p<0.05$),这说

明与单施化肥相比,有机无机配施对番茄产量提高影响不大,即化肥减施 20%~30%对番茄生长影响不大。



注:图中 a、b、c 表示各处理间的差异显著程度($p<0.05$)。

图 1 不同施肥方式番茄产量对比

Fig.1 Comparison of tomato yield with different fertilization methods

2.4 不同施肥方式对番茄品质的影响

果实中可溶性糖和可滴定酸的质量分数直接决定其鲜食口感,表 3 中可见,CBO 处理所得番茄的可溶性糖质量分数最高,与 CK 相比提高 8.6%,且 COF、CBO 及 COB 处理可溶性糖质量分数差异不显著,CF 处理所得番茄的可溶性糖质量分数最低,比 CBO 处理低 45.5% ($p<0.05$);CBO 处理所得番茄的可滴定酸质量分数最低,与 CF 处理相比低 26%,且 COF、CBO 及 COB 处理可滴定酸质量分数差异亦不显著($p<0.05$),可见化肥减施 20%~30%可显著提高番茄的鲜食口感,这一结果与果实糖酸比结果一致。维生素 C 质量分数的高低是评价果实营养品质的常见指标,COB 处理所得番茄维生素 C 质量分数最高,与 CK 及 CF 处理相比分别提高 21.6%及43.1%,CBO 处理所得番茄维生素 C 质量分数亦显著提高($p<0.05$),COF 处理所得番茄维生素 C 质量分数与 CF 处理相比提高 30.6%,可见有机无机配施可显著提高番茄维生素 C 质量分数。硝酸盐质量分数是评价各类蔬菜质量及食用安全性的重要指标,各处理所得番茄硝酸盐质量分数均低于国家标准 432.00 mg/kg,其中 CBO 处理所得番茄硝酸盐质量分数最低,其次 COF 和 COB 处理所得番茄硝酸盐质量分数亦较低,而 CF 处理所得番茄硝酸盐质量分数最高,说明有机无机配施与单施化肥相比显著降低番茄中硝酸盐质量分数。

表 3 不同施肥方式对番茄品质的影响

Table 3 Effects of different fertilization methods on tomato quality

不同施肥方式	$w(\text{可溶性糖})/\%$	$w(\text{可滴定酸})/\%$	$w(\text{维生素 C})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{硝酸盐})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	糖酸质量分数比
CK	4.26 ± 0.17^b	0.85 ± 0.08^a	14.57 ± 1.22^b	232.88 ± 7.91^{bc}	5.01
CF	2.54 ± 0.05^c	0.50 ± 0.09^b	10.57 ± 1.35^c	316.73 ± 3.77^a	5.08
COF	4.60 ± 0.03^{ab}	0.46 ± 0.04^{bc}	15.23 ± 0.92^b	242.66 ± 3.25^b	10.00
CBO	4.66 ± 0.35^a	0.37 ± 0.03^c	17.65 ± 0.76^a	219.65 ± 9.78^c	12.59
COB	4.36 ± 0.17^{ab}	0.40 ± 0.05^{bc}	18.59 ± 0.44^a	254.87 ± 22.32^b	10.90

注:表中 a、b、c 表示各处理间的差异显著程度($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤耕层理化指标影响主成分分析

由表 4 可知,前 2 个主成了解释了全部方差的 95.102%,说明提取的 2 个主成分能够代表原来 6 个土壤理化指标的 95.102%,因此,提取的 2 个主成分分别为 PC1 和 PC2。

表 4 土壤耕层理化指标主成分分析

Table 4 Principal component analysis of physicochemical indicators of soil surface

编号	总变异统计		理化指标	主成分矩阵	
	起始特征值	累积变异率累积%		PC1	PC2
1	3.925	65.411	pH	0.976	0.193
2	1.781	95.102	OM	0.914	-0.253
3	0.17	97.94	AK	0.902	-0.370
4	0.124	100	AP	0.822	-0.513
5	3.99×10 ⁻¹⁶	100	TN	0.724	0.658
6	1.28×10 ⁻¹⁶	100	AHN	0.350	0.920

根据 2 个主成分系数,得到 Y_1 和 Y_2 的线性组合为: $Y_1=0.177X_1+0.493X_2+0.365X_3+0.461X_4+0.415X_5+0.455X_6$,
 $Y_2=0.689X_1+0.145X_2+0.493X_3+0.190X_4+0.384X_5+0.277X_6$ 。

使用 SPSS 21.0 软件,将原始数据进行标准化(Z-score 法)处理后,根据主成分方程计算的主成分得分和以各个主成分方差贡献率占两个主成分总方差贡献率的比率为权重计算综合得分,得到各施肥方式对土壤耕层理化指标影响由大到小排序依次为: CBO、COB、COF、CK、CF。

3.2 土壤耕层理化指标与番茄品质的相关性

表 5 土壤耕层理化指标对番茄品质的影响

Table 5 Effects of topsoil physicochemical indicators on tomato quality

土壤理化指标	R ² 值	p 值	显著性
pH	0.766	0.001	* *
OM	0.799	0.001	* *
AK	0.793	0.001	* *
AP	0.814	0.001	* *
TN	0.630	0.002	* *
AHN	0.736	0.001	* *

采用冗余分析对土壤耕层理化指标与番茄品质相关性进行分析,土壤耕层理化性质对番茄品质的解释率为 93.671% (图 2),土壤耕层 6 个理化指标均与番茄品质显著相关(表 5)($p<0.05$)。pH、AK 与番茄各品质指标除硝酸盐外均呈正相关;OM、AP、TN 及 AHN 与番茄各品质指标除糖酸比外均呈正相关(图 2)。

注:“*”表示差异显著;“* *”表示差异极显著。

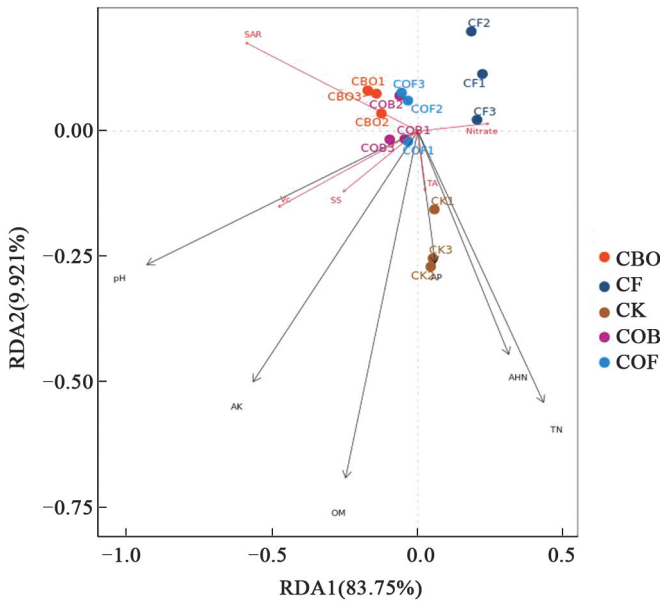


图 2 土壤耕层理化指标与番茄品质的冗余分析图

Fig.2 Redundancy analysis of topsoil physicochemical indicators and tomato quality

4 结论

本研究以畜禽养殖粪便为主要原料,以玉米秸秆糠为调理剂,其中添加质量分数 3‰ 高效发酵混合菌剂,采用具有分子过滤微孔结构的纳米复合分子膜(透湿量为 $8\,000\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,透气率为 $2\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)构建的密闭发酵系统,通过智能控制及曝气系统调节发酵温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 、氧气质量分数为 13%,物料在适宜微生物繁殖的密闭空间可实现约 15 d 稳定的高温菌快速发酵,后停止供氧进行陈化腐熟,持续发酵约 10 d 即腐熟完全,通过此法生产出符合农业部生物有机肥行业标准 NY 884—2021 的品质优良的有机肥(OF)产品,然后添加复合功效菌种开发复配出生物有机肥(BOF)。分别设计 5 组平行西红柿栽培试验,即采取 CK(不施肥)、CF(单施化肥)、COF(80%化肥+20%有机肥)、CBO(80%化肥+20%生物有机肥)及 COB(70%化肥+20%有机肥+10%生物有机肥)施肥方式,试验结束后进行土壤有机质、全氮、速效钾等养分含量及果实品质指标,如可溶性糖、维生素 C 含量等的测定,结果发现配施有机肥可使土壤中的速效氮、磷、钾相对提高,且化肥减施 20%~30% 对番茄产量影响不大。有机无机配施与单施化肥相比可显著提高果实品质,如提高可溶性糖和维生素 C 质量分数的同时有效降低可滴定酸及硝酸盐的质量分数($p<0.05$)。通过对土壤耕层理化指标影响主成分进行分析,发现各施肥方式对土壤耕层理化指标影响由大到小排序依次为:CBO、COB、COF、CK、CF。采用冗余分析对土壤耕层理化指标与番茄品质相关性进行分析,发现土壤耕层 6 个理化指标均与番茄品质显著相关($p<0.05$)。

参考文献:

- [1] PAHALVI H N, RAFIYA L, RASHID S, et al. Chemical fertilizers and their impact on soil health[M]//DAR G H, BHAT R A, MEHMOOD M A, et al. Microbiota and Biofertilizers: Vol 2. Cham: Springer, 2021: 1-20. DOI: 10.1007/978-3-030-61010-4_1.
- [2] SINGH K, GERA R, SHARMA R, et al. Mechanism and application of *Sesbania* root-nodulating bacteria: an alternative for chemical fertilizers and sustainable development[J]. Archives of Microbiology, 2021, 203(4): 1259-1270. DOI: 10.1007/s00203-020-02137-x.
- [3] WAN L J, TIAN Y, HE M, et al. Effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizer application on soil properties, *Citrus* growth physiology, and yield[J]. Agriculture, 2021, 11(12): 1207. DOI: 10.3390/agriculture11121207.
- [4] 崔永增, 姚海坡, 李谦, 等. 有机肥部分替代氮肥对优质麦生长、品质和氮效率的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(3): 158-166. DOI: 10.7668/hbxb.20194150.
- [5] 缪玉琳, 梁丰, 谢军, 等. 长期有机肥替代化肥对水稻土有机碳稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 512-522. DOI: 10.11766/trxb202105260276.
- [6] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104382. DOI: 10.1016/j.still.2019.104382.
- [7] SÁEZ J A, CLEMENTE R, BUSTAMANTE M Á, et al. Evaluation of the slurry management strategy and the integration of the composting technology in a pig farm-agronomical and environmental implications[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 192: 57-67. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.040.
- [8] HUANG G F, WU Q T, WONG J W C, et al. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(15): 1834-1842. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.08.024.
- [9] 刘世亮, 刘晨旭, 刘红恩, 等. 畜禽粪肥有机肥与氮肥配施对小麦土壤理化性状及酶活性影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(8): 45-51. DOI: 10.7606/j.issn.1004-1389.2014.08.008.
- [10] 王玉军, 窦森, 崔俊涛, 等. 复合菌剂对农业废弃物堆肥过程中理化指标变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1354-1358. DOI: 10.3321/j.issn: 1672-2043.2006.05.051.
- [11] WANG L F, LU X P, YUAN H Y, et al. Application of bio-organic fertilizer to control tomato *Fusarium* wilting by manipulating soil microbial communities and development[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(18): 2311-2322. DOI: 10.1080/00103624.2015.1081694.
- [12] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [13] 中华人民共和国农业部. 农用微生物菌剂: GB 20287—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 中华人民共和国农业部. 生物有机肥: NY 884—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.