

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0507

# 腐殖酸土壤调理剂对辣椒生长及土壤理化性质的影响

赵文瑜,王蓓,吴旭东,陈莉莉,刘庆叶,胡卫丛,  
闵梦月,张宗俊,王东升,李伟明

(南京市蔬菜科学研究所 南京 210042)

**摘要:**为探究高活性腐殖酸土壤调理剂[有机物总含量( $w$ ,后同) $\geq 65\%$ ,游离腐殖酸含量 $\geq 25\%$ ]在辣椒种植中的应用价值与土壤改良效应,以常规施肥为对照(CK),设4个处理组:T1(常规施肥+40 kg·667 m<sup>2</sup> 石灰氮)、T2~T4(常规施肥分别配施80、120、160 kg·667 m<sup>2</sup>腐殖酸土壤调理剂),分析其对辣椒生长、产量、品质及土壤理化性质的影响。结果表明,与CK和T1处理相比,施用高活性腐殖酸调理剂可显著促进辣椒生长,提升产量和品质,并改善土壤肥力与酶活性,其中以T3处理效果最优。辣椒株高、茎粗较CK分别提高10.29%、7.65%;产量较CK和T1处理分别显著提高6.76%、5.68%;土壤铵态氮、有效磷含量较CK分别提高34.51%、11.98%,脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性较CK提高10.92%~26.17%;果实维生素C和可溶性糖含量较CK分别提高22.85%、38.10%。综上,高活性腐殖酸调理剂可通过构建“土壤调理剂-施肥-辣椒生长-土壤质量”协同关系,优化土壤有效养分供给与酶活性,进而有效提升辣椒产量与品质。T3处理(常规施肥+120 kg·667 m<sup>2</sup>腐殖酸土壤调理剂)可在当地辣椒优质高效生产中推广应用。

**关键词:**辣椒;腐殖酸调理剂;生长;理化性质

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)02-135-08

## Effects of humic acid soil conditioner on pepper growth and soil physicochemical property

ZHAO Wenyu, WANG Bei, WU Xudong, CHEN Lili, LIU Qingye, HU Weicong, MIN Mengyue, ZHANG Zongjun, WANG Dongsheng, LI Weiming

(Nanjing Institute of Vegetable Science, Nanjing 210042, Jiangsu, China)

**Abstract:** To explore the application value and soil improvement effects of high-activity humic acid soil conditioner (total organic matter content $\geq 65\%$ , free humic acid content $\geq 25\%$ ) in pepper cultivation, conventional fertilization was used as the control (CK), and four treatment groups were set up: T1 (conventional fertilization+40 kg·667 m<sup>2</sup> calcium cyanamide), T2-T4 (conventional fertilization combined with 80, 120, and 160 kg·667 m<sup>2</sup> humic acid soil conditioner, respectively). The effects on pepper growth, yield, quality, and soil physicochemical properties were analyzed. The results showed that compared with CK and T1 treatment, the application of high-activity humic acid conditioner significantly promoted pepper growth, increased yield and quality, and improved soil fertility and enzyme activity, with T3 treatment showing the best results. The plant height and stem diameter of pepper increased by 10.29% and 7.65%, respectively, compared with CK; the yield significantly increased by 6.76% and 5.68% compared with CK and T1 treatment, respectively; the soil ammonium nitrogen and available phosphorus content increased by 34.51% and 11.98%, respectively, compared with CK, and the activity of urease, alkaline phosphatase, and sucrase increased by 10.92%~26.17% compared with CK; the vitamin C and soluble sugar content of fruits increased by 22.85% and 38.10%, respectively, compared with CK. In summary, high-activity humic acid soil conditioner can optimize soil available nutrient supply and enzyme activity by establishing a synergistic relationship of "soil conditioner-fertilization-pepper growth-soil quality", thereby effectively improving pepper yield and quality. T3 treatment (conventional fertilization+120 kg·667 m<sup>2</sup> humic acid soil conditioner) can be promoted and applied in the high-quality and efficient production of local pepper.

**Key words:** Pepper; Humic acid conditioner; Growth; Physicochemical property

收稿日期:2025-07-15;修回日期:2025-11-12

基金项目:南京市蔬菜科学研究所社发项目

作者简介:赵文瑜,女,助理农艺师,主要从事土壤肥料与土壤改良研究。E-mail:445887074@qq.com

通信作者:李伟明,男,高级农艺师,主要从事设施蔬菜栽培和土壤肥料研究。E-mail:407141277@qq.com

土壤作为农业生产的载体,其质量不仅直接决定作物产量与品质,更是保障粮食安全及农业可持续发展的关键要素。当前,我国耕地资源紧张且质量问题突出<sup>[1]</sup>,红壤、褐土等典型耕地因长期不合理施肥与连作,普遍面临 pH 失衡、有机质含量降低、速效养分匮乏等问题,严重抑制作物生长<sup>[2-3]</sup>。在此背景下,物理、化学、生物多维度协同的土壤改良技术已成为研究的重点,其中,有机物料与土壤调理剂对作物连作障碍的缓解作用已得到诸多研究证实。朱铭等<sup>[4]</sup>针对浙江红壤酸化问题的研究表明,石灰石粉与腐殖酸配施可使土壤 pH 提升 1.17~1.60,有机质含量提高 23.9%;朱慧等<sup>[4]</sup>研究发现,减少化肥用量并配施不同类型土壤调理剂,能显著提高连作樱桃番茄土壤的速效养分含量、总孔隙度及土壤酶活性;Zhang 等<sup>[5]</sup>研究表明,生物质炭与蚯蚓粪可降低黄壤区辣椒硝酸盐含量,同时提高果实维生素 C 与糖分含量,进而改善辣椒品质。

辣椒作为全球广泛种植的优势蔬菜,不仅是重要的调味食材,还富含维生素 C、辣椒素等功能性成分,兼具抗氧化、促消化等保健功效<sup>[6]</sup>。但随着设施蔬菜产业的快速发展,辣椒连作引发的土壤退化问题日益凸显:长期连作导致土壤 pH 降至 5.5 以下,速效磷固定率高达 40%,且伴随微生物群落失衡与根腐病菌等病原菌积累,最终造成辣椒产量逐年递减,品质显著下降<sup>[6]</sup>,这一现状使腐殖酸土壤调理剂在辣椒种植中的应用研究更具现实价值,而现有蔬菜领域相关方面的研究可为其提供参考。孙彩霞等<sup>[7]</sup>研究发现,600 g·m<sup>-2</sup>腐殖酸可改善番茄连作土壤细菌群落结构,提高果实品质。王文英等<sup>[3]</sup>证实腐殖酸调理剂配施常规施肥能提升西瓜坐果数与土壤速效钾含量。吴文静<sup>[8]</sup>研究表明,随着腐殖酸施用量增加,白菜产量呈先增后减的变化趋势,360 kg·667 m<sup>-2</sup> 处理实现增产 15.0%,但需优化以防资源浪费。针对辣椒的研究中,韦静等<sup>[6]</sup>研究发现,合理施氮(180 kg·hm<sup>-2</sup>)可提升辣椒产量和维生素 C 含量;庄明育等<sup>[9]</sup>研究表明,120 kg·667 m<sup>-2</sup> 腐殖酸调理剂使土壤铵态氮、有效磷含量分别提升 34.51% 和 11.98%,促进间作辣椒增产 9.80%。

现有研究虽证实了土壤调理剂与施肥对作物生长及土壤的改良效果,但仍存在明显不足:一是针对辣椒连作土壤的复合调理剂协同效应研究较为薄弱,二是调理剂通过调控土壤微生物群落及脲酶、蔗糖酶等酶的活性影响辣椒生长的机制尚未深入揭示,难以支撑辣椒专用调理剂的用量与配比优

化。基于此,笔者以辣椒为研究对象,聚焦“土壤调理剂-施肥-辣椒生长-土壤质量”的协同关系,采用“腐殖酸调理剂+优化施肥”组合模式,综合探究石灰氮、腐殖酸调理剂与化肥、有机肥配施对土壤理化性质及酶活性的协同影响,揭示其与辣椒生长、产量及品质的关联机制,以期筛选出改良辣椒土壤的最佳调理剂组合与用量。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验在南京市蔬菜科学研究所蔬菜科技园“8332”大棚内进行,试验地块辣椒连续种植 8 年,土壤类型为黄棕壤。试验地土壤基础理化性质为:pH 5.24,有机质含量(*w*,后同) 15.97 g·kg<sup>-1</sup>,铵态氮含量 6.40 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮含量 20.82 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量 176.13 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 189.25 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[10]</sup>。

辣椒品种为苏椒 5 号,为江苏省农业科学院蔬菜研究所选育的一种极早熟辣椒一代杂交品种,购自金盛达种子有限公司,种子发芽率≥95%。

普通商品有机肥为鸡粪,购买于当地农资市场;复合肥 [(N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O) 含量≥45%, 配比 15-15-15] 由安徽省司尔特肥业股份有限公司生产;石灰氮品牌名荣宝,由石海化工(上海)有限公司提供,该产品的推荐施肥量为 40 kg·667 m<sup>-2</sup>;腐殖酸调理剂以天然优质腐殖质材料资源为原料,与土壤腐殖质同根同源,其中有机物总含量≥65%,游离腐殖酸含量≥25%,pH 为 8.0~10.0,K<sub>2</sub>O 含量≥4%,由中向旭曜科技有限公司生产。

### 1.2 方法

试验采用随机区组设计,共设置 5 个不同配方施肥处理,分别为 CK(常规施肥)、T1、T2、T3、T4(具体处理方案见表 1),每个处理设 3 次重复,小区面积 10 m<sup>2</sup>(长 5 m×宽 2 m),小区间隔 40 cm,每个小区种植 4 行,每行 13 株,总计 52 株。试验中包括腐殖酸调理剂在内的所有肥料均以基肥形式一次性施入土壤,整个生育期不再进行追肥。

本试验于 2024 年 3 月 20 日定植,5 月 23 日开始采收。在辣椒生长周期内,于 4 月底测定植株生长指标,包括株高、茎粗和叶绿素相对含量(SPAD);收获期分 7 次(分别于 5 月 23 日、5 月 29 日、6 月 4 日、6 月 11 日、6 月 20 日、7 月 1 日、7 月 12 日)采收,采收后累计计算各处理小区的总产量。在品质测定方面,选取每个小区长势均匀的 3 株辣椒作为样本;土壤指标测定则采集耕层(10~20 cm)土

表1 不同处理施肥方法  
Table 1 Fertilization methods of different treatments

处理 Treatment	实际施肥量 Actual fertilizer amount/(kg·667 m <sup>-2</sup> )				小区施肥量 Plot fertilization amount /(kg·10 m <sup>-2</sup> )			
	商品有机肥 Commercial organic fertilizer	45%复合肥 45% compound fertilizer	石灰氮 Calcium cyanamide	腐殖酸调理剂 Humic acid conditioner	商品有机肥 Commercial organic fertilizer	45%复合肥 45% compound fertilizer	石灰氮 Calcium cyanamide	腐殖酸调理剂 Humic acid conditioner
CK	500	30	0	0	7.5	0.45	0.0	0.0
T1	500	30	40	0	7.5	0.45	0.6	0.0
T2	500	30	0	80	7.5	0.45	0.0	1.2
T3	500	30	0	120	7.5	0.45	0.0	1.8
T4	500	30	0	160	7.5	0.45	0.0	2.4

壤,将土壤样本带回实验室阴干后,用于分析土壤酶活性及土壤养分含量。

### 1.3 测定指标及方法

采用直尺测量株高;采用游标卡尺测定茎基第一节间的粗度为茎粗;采用叶绿素仪(TYS-A,浙江托普云农科技股份有限公司)测定叶绿素相对含量(SPAD)。采用50 kg级电子秤称量辣椒果实产量,换算成667 m<sup>2</sup>产量。

采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量<sup>[11]</sup>,采用考马斯亮蓝G-250法测定可溶性蛋白含量<sup>[12]</sup>,采用高效液相色谱法测定维生素C含量<sup>[13]</sup>。

参照周武先等<sup>[14]</sup>的方法测定土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性。参考鲍士旦<sup>[10]</sup>的《土壤农化分析》测定土壤养分含量,采用重铬酸钾氧化还原滴定外加热法测定有机质含量;采用NaOH碱解扩散法测定速效氮含量,采用0.03 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F-0.025 mol·L<sup>-1</sup> HCl浸提-钼蓝比色法测定速效磷含量;采用醋酸铵浸提-火焰分光光度计法测定速效钾含量。

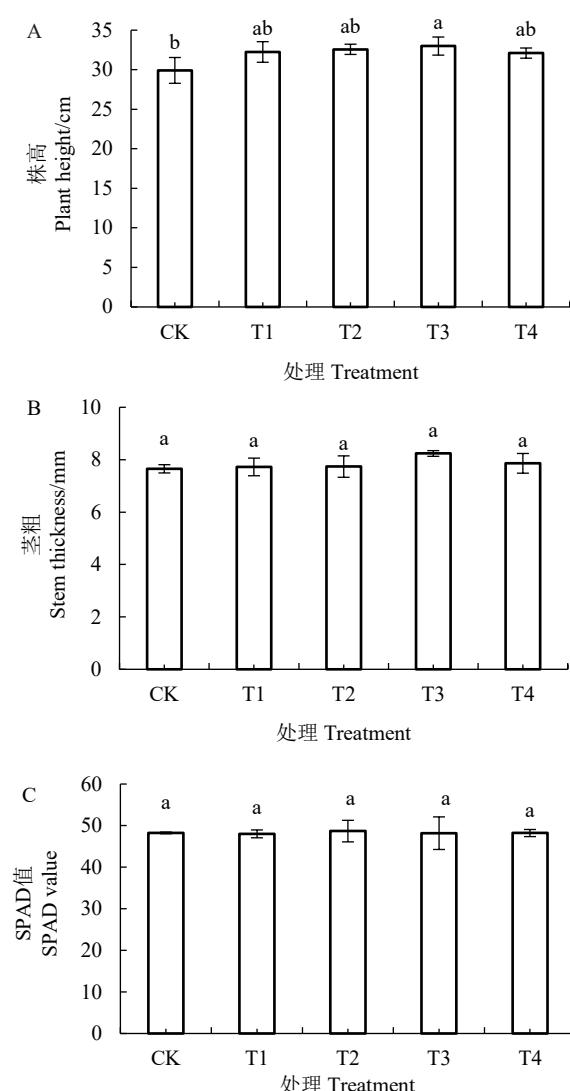
### 1.4 数据分析

采用Excel 2016整理数据和绘图,使用SPSS 26.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA),组间差异比较采用Duncan新复极差法( $P<0.05$ )。相关性分析采用Pearson系数,探究土壤理化性质与酶活性、作物生长指标的关联性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同配方施肥对辣椒形态特征及SPAD值的影响

由图1-A可知,不同配方施肥对辣椒株高的影响存在差异,表现为T3>T2>T1>T4>CK,其中T3处理显著高于CK;T1、T2和T4处理间无显著差异。不同配方施肥的辣椒茎粗表现为T3>T4>T2>



注:不同小写字母代表差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ). The same below.

图1 不同配方施肥对辣椒株高(A)、茎粗(B)、SPAD值(C)的影响

Fig. 1 Effects of different fertilizer formulations on plant height(A), stem thickness(B), and SPAD value(C) of pepper

T1>CK, 各处理相比差异均不显著(图1-B)。不同配方施肥的辣椒SPAD值差异不显著, T2处理最高(图1-C)。综上,施用腐殖酸调理剂的辣椒长势与CK基本相当,其中T3处理(常规施肥+120 kg·667 m<sup>-2</sup>腐殖酸土壤调理剂)的株高显著高于常规施肥处理。

## 2.2 不同配方施肥对辣椒产量的影响

由表2可知,辣椒产量表现为T3>T4>T2>T1>CK,其中T3、T4和T2处理较CK分别显著提高6.76%、5.80%和4.44%,T1处理与CK差异不显著;T3和T4处理较T1处理分别显著提高5.68%和4.58%;T3处理与T4处理差异不显著,说明腐殖酸

表2 不同配方施肥处理对辣椒产量的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on pepper yield

处理 Treatment	小区产量 Plot yield/kg	产量 Yield/(kg·667 m <sup>-2</sup> )	与 CK 相比 Compared to CK		与 T1 相比 Compared to T1	
			增产 Yield increase/ (kg·667 m <sup>-2</sup> )	增产率 Yield increase rate/%	增产 Yield increase/ (kg·667 m <sup>-2</sup> )	增产率 Yield increase rate/%
CK	48.80±0.87 d	3 255.03±57.71 d			-33.28	-1.01
T1	49.30±0.78 cd	3 288.31±52.13 cd	33.28	1.02		
T2	50.97±2.50 bc	3 399.48±167.08 bc	144.45	4.44	111.17	3.38
T3	52.10±1.47 a	3 475.07±98.34 a	220.04	6.76	186.76	5.68
T4	51.63±1.03 ab	3 443.98±68.55 ab	188.95	5.80	155.67	4.58

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

调理剂的施用能提高辣椒产量,与常规施肥处理相比增产效果明显。

## 2.3 不同配方施肥对辣椒品质的影响

由图2可知,不同配方施肥处理提高了辣椒蛋白质和维生素C含量,但不同处理间差异均不显著,其中T3处理的蛋白质含量最高,T4处理的维

生素C含量最高。不同配方施肥处理不同程度提高了辣椒可溶性糖含量,其中T3处理较CK显著提高0.21百分点,T1、T2和T4处理与CK差异不显著。由此可见,腐殖酸调理剂的施用能提高辣椒果实的蛋白质、可溶性糖和维生素C含量,有效改善辣椒品质。

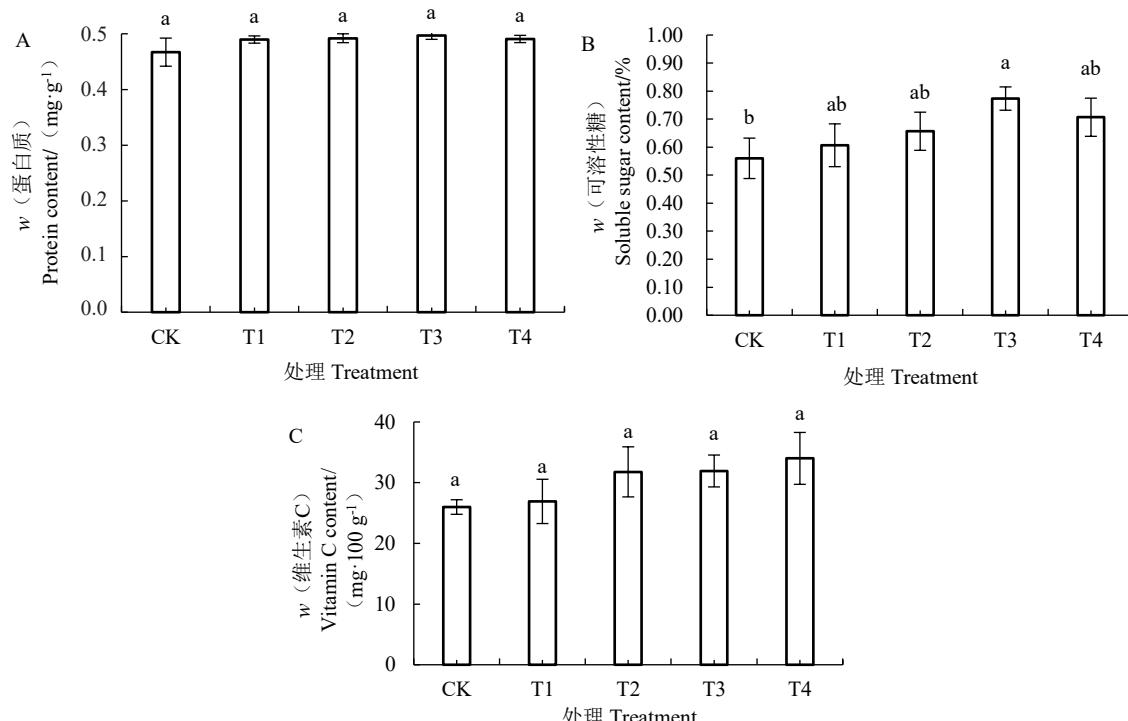


图2 不同配方施肥对辣椒品质的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization formulations on pepper quality

## 2.4 不同配方施肥对辣椒土壤酶活性的影响

由图 3-A 可知,不同配方施肥处理不同程度提高了土壤的碱性磷酸酶活性,随着腐殖酸调理剂施用浓度的增加,其活性不断提高,T4 处理最高,但不同处理间差异均不显著。由图 3-B 可知,不同配方施肥处理不同程度提高了土壤的脲酶活性,其中 T2

和 T4 处理较 CK 分别显著提高 21.79% 和 21.80%。由图 3-C 可知,土壤过氧化氢酶活性在不同配方施肥处理下呈先降后升的变化趋势,除 T2 处理外,其他处理均高于 CK,其中 T4 处理的酶活性最高,但与 CK 差异不显著。由图 3-D 可知,不同配方施肥处理均显著提高了土壤的蔗糖酶活性,其

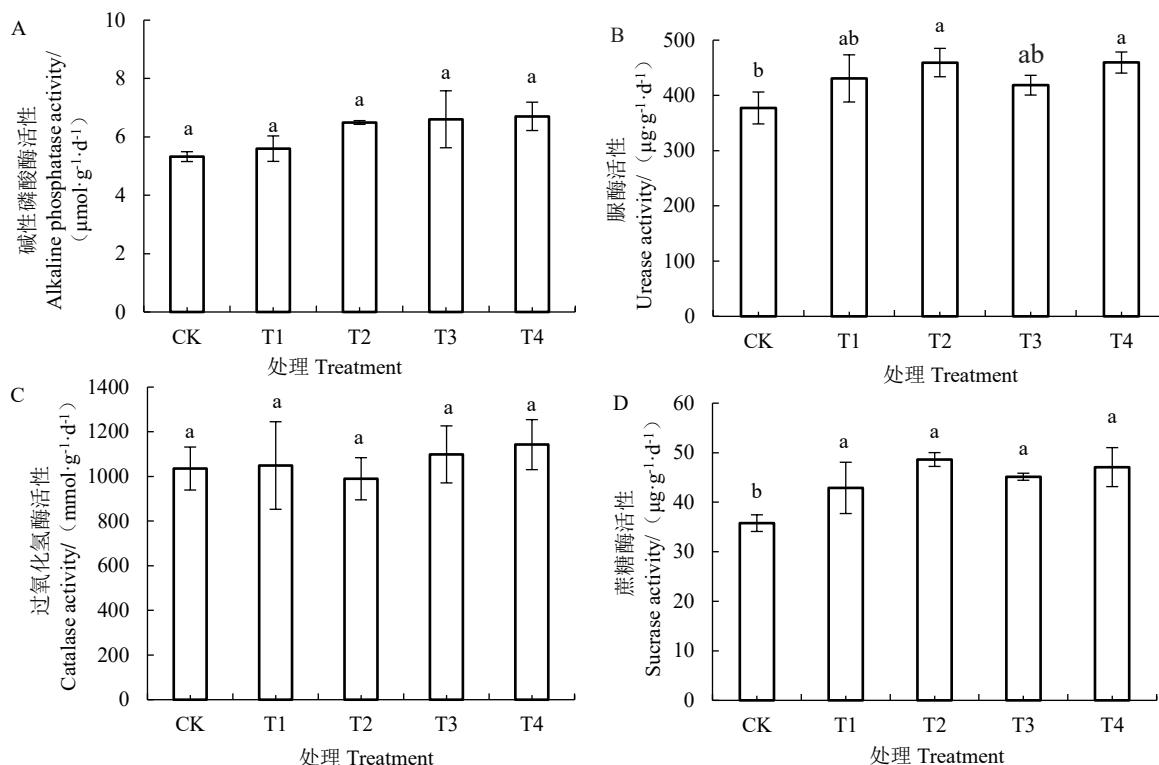


图 3 不同配方施肥对辣椒土壤酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization formulations on soil enzyme activity in pepper

中 T2 处理最高,较 CK 显著提高 35.91%。

## 2.5 不同配方施肥对土壤养分含量及 pH 的影响

由图 4 可知,辣椒土壤养分中有机质、铵态氮、有效磷和速效钾含量在不同配方施肥处理下均无显著差异,其中 T4 处理的土壤有机质含量高于 T1、T2、T3 处理和 CK,较 CK 和 T1 处理分别提高 13.52% 和 7.34%(图 4-A);不同配方施肥处理的辣椒土壤 pH 变化不明显,T4 处理略高于其他处理(图 4-B);T1 处理的土壤铵态氮含量最高,与 CK 相比提高 51.10%(图 4-C);T4 处理的土壤硝态氮含量最高,显著高于 T3 处理,与其他处理相比差异不显著,较 CK 提高 13.08%(图 4-D);T3 处理的土壤有效磷含量略高于其他处理(图 4-E);T4 处理的土壤速效钾含量高于其他处理(图 4-F)。

## 2.6 辣椒相关性状和土壤理化性质的相关性分析

由图 5 可知,辣椒叶片 SPAD 值与 pH、有效磷含量和过氧化氢酶活性呈显著正相关,与有机质含量呈极显著负相关;有效磷含量与速效钾含量呈显著正相关;产量与株高、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、维生素 C 含量、可溶性糖含量、蛋白质含量均呈显著正相关;蔗糖酶活性与株高、脲酶活性、铵态氮含量、维生素 C 含量、可溶性糖含量呈显著正相关;过氧化氢酶活性与株高呈显著正相关,与 pH 呈极显著正相关。

## 3 讨论与结论

本研究结果表明,施用腐殖酸调理剂显著提升了辣椒产量,同时不同程度提高了蛋白质、可溶性糖和维生素 C 含量,改善了果实品质,与多个试验

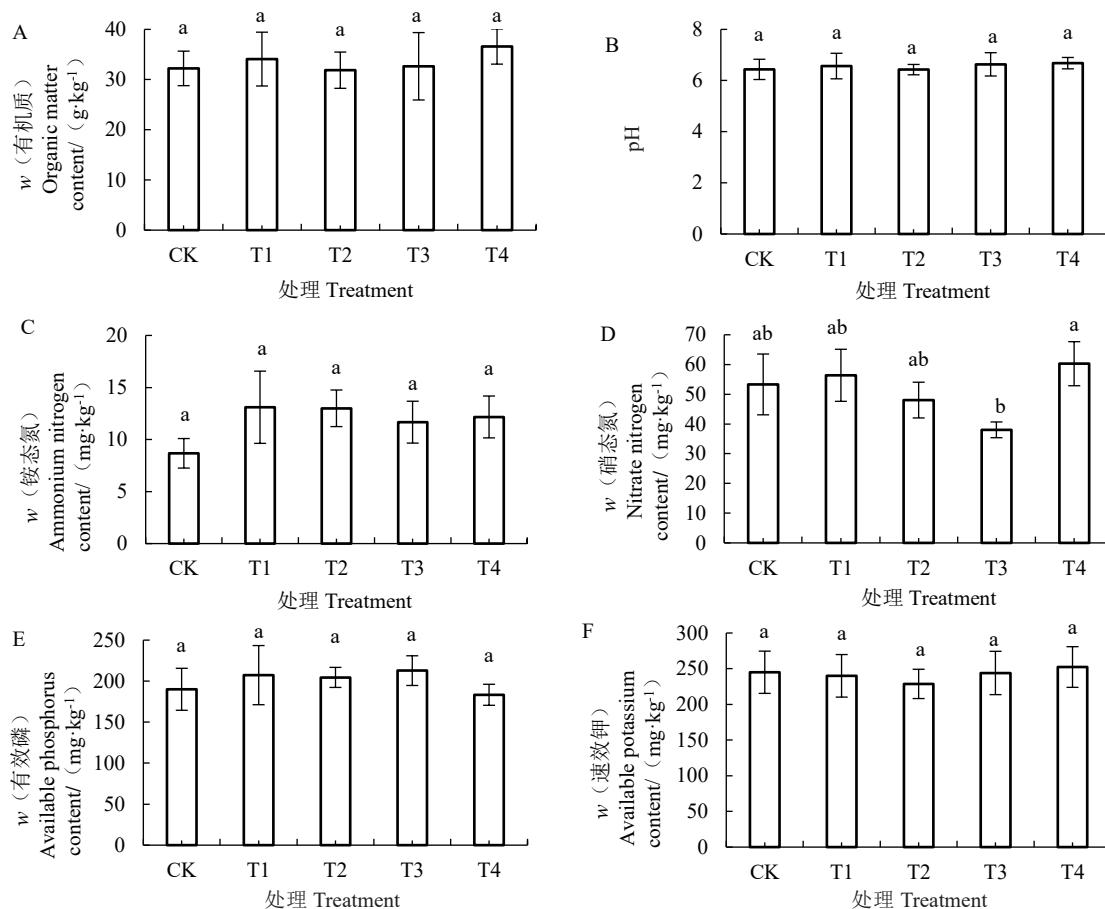
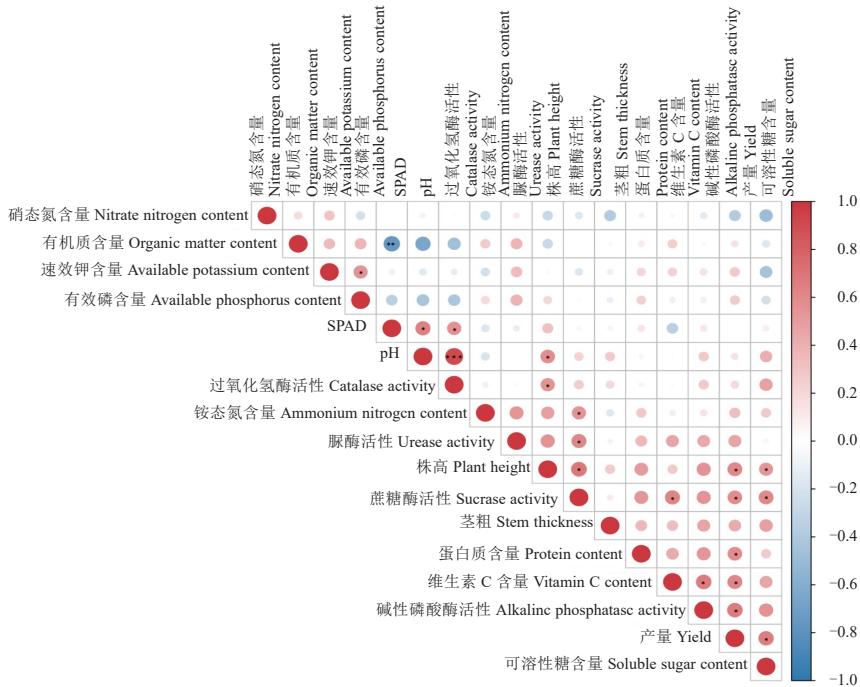


图 4 不同配方施肥对辣椒土壤养分含量及 pH 的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization formulations on soil nutrient content and pH



注: \*代表在 0.05 水平显著相关, \*\*代表在 0.01 水平极显著相关, \*\*\*代表在 0.001 水平极显著相关。

Note: \* represents significant correlation at 0.05 level, \*\* represents extremely significant correlation at 0.01 level, \*\*\* represents extremely significant correlation at 0.001 level.

图 5 辣椒形态特征、产量、品质、土壤酶活性以及土壤养分含量的相关性

Fig. 5 Correlation of morphological characteristics, yield, quality of pepper, soil enzyme activity and soil nutrient content

的研究结果一致。张泽清<sup>[15]</sup>研究发现,添加特定比例腐植酸钾与 EDTA-Mg 的水溶肥,能显著提升辣椒产量,果实全氮、可溶性糖等含量也有所增加,与本研究中腐殖酸调理剂提升辣椒产量和可溶性糖含量的结果一致。众多的研究表明,腐殖酸在其他作物上也发挥着类似作用。孙海龙<sup>[16]</sup>在芹菜上的研究显示,喷施含腐植酸的水溶肥显著增加株高、单株质量,增产 6.96%,与本研究中辣椒产量提高 6.76% 的研究结果一致,有力印证了腐殖酸对作物生长的促进作用。罗利艳等<sup>[17]</sup>在番茄上的试验表明,含腐殖酸复合肥通过提高土壤全氮、有效磷等养分含量,使产量提升 38.05%,进一步支撑了腐殖酸通过养分调控实现增产的共性机制。从作用机制来看,腐殖酸具有特殊的分子结构,能够改良土壤物理性质,增强土壤保水保肥能力,为辣椒根系生长创造适宜环境,促进养分吸收,从而驱动植株生长与物质积累,最终实现产量提升与品质改善。田佳美等<sup>[18]</sup>研究表明,含腐殖酸复合肥可显著提高辣椒果实可溶性糖和维生素 C 含量,降低硝酸盐含量,与本研究中可溶性糖、维生素 C 含量的提升结果高度吻合。刘宇锋等<sup>[19]</sup>研究发现,外源腐殖酸通过提高栽培基质腐殖酸含量,改善辣椒可溶性糖含量等品质指标,其通过调节碳氮代谢(如蔗糖合成酶活性)优化品质的机制,也与本研究结果一致。本研究中,T3 处理表现最佳,在此施肥条件下土壤改良、养分调控与代谢调节作用达到平衡,协同提升产量与品质。

本研究结果表明,腐殖酸调理剂通过显著提升土壤酶(脲酶、蔗糖酶)活性和养分含量,促进辣椒株高增长与土壤地力改善。过氧化氢酶活性的增强(T4 处理)可能源于腐殖酸为微生物提供碳源,促进其繁殖,从而增强土壤氧化过程强度<sup>[20]</sup>;蔗糖酶活性提升则与腐殖酸刺激植物根系分泌更多蔗糖酶相关,同时腐殖酸与蔗糖酶形成复合体,稳定酶结构以提高活性,与田佳美等<sup>[18]</sup>研究中腐殖酸显著提升辣椒蔗糖酶活性的结果一致。土壤有机质含量提升(增加 13.52%)与腐殖酸本身作为有机物质直接输入土壤有关<sup>[21]</sup>,其稳定的化学结构可增加土壤碳库,与刘宇锋等<sup>[19]</sup>研究中腐殖酸提高基质有机质含量的结论相符。而铵态氮和有效磷含量的提高,是因为腐殖酸具有强大的吸附能力,能减少养分流失,提高肥料利用率,与王子豪等<sup>[22]</sup>研究中腐殖酸通过吸附作用提升土壤有效养分的结果一致。与前人研究结果相比,本研究中腐殖酸调理剂对辣椒生

长和土壤地力提升的效果更显著。苟久兰等<sup>[23]</sup>研究了腐植酸液体肥对贵州鲜食辣椒生物效应、肥料利用率及土壤理化性状的影响,发现腐植酸液体肥能够提高氮肥和磷肥的表观利用率及土壤酶活性,促进土壤养分有效转化,但在土壤酶活性的提升幅度上小于本研究。范仲卿等<sup>[24]</sup>研究不同配比腐植酸复合肥对种植干椒 3 号的影响时发现,施用腐植酸复合肥可提高土壤酶活性和养分含量,但在株高促进效果以及土壤有机质含量提升比例上,本研究的腐殖酸调理剂表现更优。田佳美等<sup>[18]</sup>研究含腐殖酸复合肥对辣椒生长及产量的影响,发现该复合肥能提升辣椒产量和品质,但在土壤酶活性及养分含量提升方面,本研究的调理剂效果更突出。这可能是由于本研究中腐殖酸调理剂的配方、施用量以及施用方式更契合辣椒生长需求和土壤环境。

笔者通过对辣椒生长指标(株高、产量、叶片 SPAD 值)、品质指标(维生素 C 含量、可溶性糖含量、蛋白质含量)与土壤理化性质指标的相关性分析,旨在量化土壤-作物系统中关键指标间的关联特征。其中,SPAD 值与 pH、有效磷含量、过氧化氢酶活性呈显著正相关,与有机质含量呈极显著负相关。这与王子豪等<sup>[22]</sup>的研究结果一致,即有效磷含量提升可促进叶绿素合成(SPAD 值升高);刘宇锋等<sup>[19]</sup>研究发现,外源腐殖酸能提高辣椒抗氧化酶活性,间接保护叶绿体,与过氧化氢酶对 SPAD 值的正向影响相符。腐殖酸在微碱性环境中能有效激活过氧化氢酶,同时通过提高磷有效性,促进氮代谢<sup>[25]</sup>,但高有机质含量可能暂时降低氮矿化速率<sup>[26]</sup>。产量与株高、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性及果实维生素 C 含量、可溶性糖含量呈显著正相关,体现“生长-养分-品质”的协同效果。刘宇锋等<sup>[19]</sup>研究发现,腐殖酸显著增加辣椒株高和生物量,印证株高对产量的基础作用;罗利艳等<sup>[17]</sup>在番茄研究中证实土壤酶活性与产量呈正相关,与本研究中碱性磷酸酶、蔗糖酶促进养分转化、提升产量的结果一致;田佳美等<sup>[18]</sup>研究表明,腐殖酸复合肥显著提高辣椒维生素 C 和可溶性糖含量,说明品质与产量的协同源于充足的养分供应。蔗糖酶活性与株高、脲酶活性、铵态氮含量及果实品质呈显著正相关,说明腐殖酸通过激发微生物活性,同步提升碳氮循环效率<sup>[27]</sup>。孙海龙<sup>[16]</sup>在芹菜研究中发现,腐殖酸提升蔗糖酶活性伴随株高增加,印证其供能作用;腐殖酸可同步提升蔗糖酶和脲酶活性,二者协同增加铵态氮含量,进而促进辣椒品质改善。

综上所述,腐殖酸调理剂可不同程度提升辣椒株高、产量、可溶性糖含量、土壤酶活性(如过氧化氢酶、蔗糖酶)和养分含量,且土壤理化性质与辣椒性状间存在不同程度的相关性,明确了腐殖酸调理剂对辣椒生长及土壤环境的优化机制。推荐T3处理(常规施肥+腐殖酸调理剂 $120\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ )作为辣椒高效种植的方案,可显著增产6.76%并改善果实品质;T4处理(常规施肥+腐殖酸调理剂 $160\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ )适用于土壤改良。在规模化辣椒基地推广应用腐殖酸调理剂,应结合监测土壤酶活性动态变化,合理调整施肥策略。

### 参考文献

- [1] 朱铭,刘琛,林义成,等.不同调理剂组合对浙江红壤土壤肥力、微生物群落多样性和水稻产量的影响[J].浙江农业学报,2022,34(6):1258-1267.
- [2] 赵丽芳,黄鹏武,陈翰,等.土壤调理剂与有机肥配施治理红壤茶园土壤酸化与培育地力的效果[J].浙江农业科学,2022,63(11):2692-2695.
- [3] 王文英,刘喜存,霍建中,等.不同含量土壤调理剂对重茬地西瓜产量和土壤化学性质的影响[J].中国瓜菜,2023,36(1):67-71.
- [4] 朱慧,何颖悦.不同土壤调理剂配施对连作番茄土壤特性和产量与果实品质的影响[J].中国瓜菜,2023,36(5):104-108.
- [5] ZHANG M, LIU Y L, WEI Q Q, et al. Effects of biochar and vermicompost on growth and economic benefits of continuous cropping pepper at Karst yellow soil region in Southwest China[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1238663.
- [6] 韦静,郭勤卫,张婷,等.不同施氮水平对白辣椒生长、产量和品质的影响[J].热带作物学报,2024,46(4):948-957.
- [7] 孙彩霞,刘玉红,杨艳,等.不同肥料对番茄品质及连作土壤细菌群落结构的影响[J].浙江农业科学,2022,63(5):1074-1078.
- [8] 吴文静.含腐殖酸土壤调理剂在白菜上的肥效试验[J].蔬菜,2014(8):30-31.
- [9] 庄明育,包徐娇,刘天鸿,等.不同比例有机肥等氮替代化肥对海南胶园土壤活性有机碳组分及酶活性的影响[J].环境科学,
- 1-14[2025-06-16].<https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202502074>.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2005.
- [11] 谢建昌.菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥[M].南京:河海大学出版社,1997.
- [12] 赵明,蔡葵,孙永红,等.不同施肥处理对番茄产量品质及土壤有效态重金属含量的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1072-1078.
- [13] 单建明,袁卫民,田丽敏,等.蘑菇菌糠堆肥在小白菜上的肥效研究[J].安徽农业科学,2012,40(32):15684-15685.
- [14] 周武先,李梦歌,谭旭辉,等.播种密度对不同季节半夏生长、品质及土壤酶活性的影响[J].作物杂志,2022(4):205-213.
- [15] 张泽清.苏州葛林美含腐植酸水溶肥料的效应[J].农技服务,2009,25(1):45.
- [16] 孙海龙.含腐植酸水溶肥在芹菜上的应用效果[J].腐植酸,2023(3):28-30.
- [17] 罗利艳,伊微,田佳美,等.含腐殖酸复合肥对番茄植株生长及产量的影响[J].肥料与健康,2023,50(2):48-50.
- [18] 田佳美,伊微,罗利艳,等.含腐殖酸复合肥对辣椒生长及产量的影响[J].肥料与健康,2023,50(1):51-53.
- [19] 刘宇锋,罗佳,苏天明,等.外源腐殖酸对栽培基质性状和辣椒生长发育的影响[J].江苏农业学报,2016,32(3):647-655.
- [20] 曾秀君,黄学平,程坤,等.石灰组配有机改良剂对农田铅镉污染土壤微生物活性的影响[J].环境科学研究,2020,33(10):2361-2369.
- [21] 武希安,李耀,李鹏飞,等.基于土壤生态平衡的碱性土壤有机质提升方法研究[J].中国资源综合利用,2025,43(4):196-198.
- [22] 王子豪,周雪,张冬寒,等.含腐植酸水溶肥料对玉米苗生长及土壤改良的影响[J].中国农业科技导报,2025,27(4):209-220.
- [23] 芮久兰,张萌,魏全全,等.腐殖酸液体肥对贵州鲜食辣椒生物效应及肥料利用率的影响[J].北方园艺,2021(18):36-41.
- [24] 范仲卿,郭新送,张晶,等.不同配比腐植酸复合肥对种植辣椒的土壤酶活性和养分含量的影响[J].腐植酸,2022(4):42-46.
- [25] 刘晨阳,高成林,赵玥,等.农田裁参土壤改良中肥料对土壤元素及酶活性的影响[J].生态科学,2021,40(2):40-47.
- [26] 路明艺,师晓爽,冯权,等.不同牡蛎壳粉添加量对沼渣堆肥有机质降解及氮损失的影响[J].中国沼气,2021,39(3):13-20.
- [27] 王军东,马奔腾,王芷.土壤调理剂对设施蔬菜、土壤性质及菌群的影响[J].环境科学与技术,2025,48(11):19-28.