



韩传坤,徐伟敏,马雨佳,宋秩宇,范学明,栾桢,李志芳,陈清,高丽红,张文娜.生物刺激剂配施富氢水对设施番茄品质和土壤改良的效果分析[J].中国农业大学学报,2025,30(09):161-174.

HAN Chuankun, XU Weimin, MA Yujia, SONG Zhiyu, FAN Xueming, LUAN Zhen, LI Zhifang, CHEN Qing, GAO Lihong, ZHANG Wenna. Effects of combined application of biostimulants and hydrogen-richwater on tomato quality and soil improvement in greenhouse systems [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 161-174.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.15

生物刺激剂配施富氢水对设施番茄品质和土壤改良的效果分析

韩传坤¹ 徐伟敏¹ 马雨佳¹ 宋秩宇² 范学明³ 栾桢² 李志芳¹
陈清⁴ 高丽红¹ 张文娜^{1*}

(1. 中国农业大学 园艺学院/设施蔬菜生长发育调控北京市重点实验室,北京 100193;

2. 北京氢润科技有限公司,北京 101100;

3. 山东诸城市浩辰生物科技有限公司,山东 诸城 262200;

4. 中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室,北京 100193)

摘 要 为探究富氢水、微生物菌剂和生物刺激剂(有机钙、甜菊苷)联合施用对作物品质及土壤改良的应用效果,以‘京采8号’番茄为试验品种,在大棚中种植春秋2茬,于番茄生长过程中联合施用上述物质,测定番茄生长指标、果实品质及土壤理化性质。结果表明:1)富氢水+微生物菌剂(HM)处理较自来水对照(CK₁)显著提高春茬定植初期株高、果实维生素C、可溶性固形物含量及土壤速效磷和全氮含量($P<0.05$),提升秋茬定植后期茎粗、坐果率、糖酸比及土壤速效钾含量。2)富氢水+微生物菌剂+有机钙复配(HMC)处理较对照、菌剂处理(M)、富氢水+微生物菌剂处理显著提高春茬果实维生素C含量和2茬土壤中速效钾和全氮含量($P<0.05$),降低土壤中的pH和EC值。综上,富氢水与微生物菌剂复配能有效促进番茄生长,改善特定穗位果实品质,并提升速效养分改良土壤。在添加菌剂的基础上联合施用生物刺激剂,富氢水、微生物菌剂与有机钙复配对促进番茄植株生长、提升多穗位果实维C含量及改良土壤理化性质的效果最优。

关键词 番茄;富氢水;生物刺激剂;品质;土壤改良

中图分类号 S641.2;S158.3

文章编号 1007-4333(2025)09-0161-14

文献标志码 A

Effects of combined application of biostimulants and hydrogen-richwater on tomato quality and soil improvement in greenhouse systems

HAN Chuankun¹, XU Weimin¹, MA Yujia¹, SONG Zhiyu², FAN Xueming³, LUAN Zhen²,
LI Zhifang¹, CHEN Qing⁴, GAO Lihong¹, ZHANG Wenna^{1*}

(1. College of Horticulture/Beijing Key Laboratory of Growth and Development Regulation for Protected Vegetables, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Beijing Qingrun Technology Co., Ltd., Beijing 101100, China;

3. Haochen Biotechnology Co., Ltd., Zhucheng 262200, China;

4. College of Resources and Environment/Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention, Control and Remediation, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

收稿日期: 2025-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2300703); 中国农业“2115 人才培养发展支持计划”项目(00109016); 国家大学生 URP 创新性实验计划项目(X2024100190740)

第一作者: 韩传坤(ORCID:0009-0006-5250-5571), 硕士研究生, E-mail: m18263126020@163.com

通讯作者: 张文娜(ORCID:0000-0003-4094-9766), 副教授, 主要从事设施蔬菜高效栽培研究, E-mail: zhangwenna@cau.edu.cn

Abstract To explore the application effects of combined of hydrogen-rich water, microbial agents, and biostimulants (organic calcium, stevioside) on crop quality and soil improvement, this study took ‘Jingcai No. 8’ tomato as the test variety, planted two crops (spring and autumn) in greenhouses, and applied the above substances in combination during the growth process of tomatoes, and determined tomato growth indicators, fruit quality, and soil physical and chemical properties. The results showed that: 1) Compared with the tap water control (CK₁), the hydrogen-rich water+microbial inoculant treatment (HM) significantly increased plant height, vitamin C content, soluble solids content in fruits ($P<0.05$) at the early stage of transplanting, as well as available phosphorus and total nitrogen contents in soil in the spring crop ($P<0.05$), and increased stem diameter, fruit setting rate, sugar-acid-ratio, and soil available potassium content in the late stage of autumn planting. 2) Compared with the tap water control (CK₂), microbial inoculant control (M), and hydrogen-rich water+microbial inoculant treatment (HM), the hydrogen-rich water+microbial inoculant+organic calcium treatment (HMC) significantly increased the vitamin C content in spring crop fruits, available potassium and total nitrogen contents in soil of both crops ($P<0.05$), while reducing the pH and EC values in the soil. In conclusion, HM can effectively promote tomato growth, improve fruit quality at specific ear positions, and enhance available nutrients to improve soil. When biostimulants are applied in combination with microbial inoculants, HMC exhibits the best effect on promoting tomato plant growth, increasing the vitamin C content in fruits at multiple ear positions, and improving soil physicochemical properties.

Keywords tomato; hydrogen-rich water; biostimulants; quality; soil improvement

随着人民生活水平的提升,我国蔬菜消费需求持续增长。作为全球最大的蔬菜生产国和消费国,设施蔬菜产业已成为我国农业领域中不可或缺且发展迅猛的重要组成部分^[1]。番茄作为全球栽培面积最广、消费量最大的蔬菜作物,在我国设施蔬菜产业中占据核心地位,具有极高的经济价值^[2]。粗放式发展模式也导致了土壤养分失衡和连作障碍等严峻问题,科学施肥对提升肥料利用率,保障土壤可持续生产至关重要^[3]。因此,探索提升番茄产量与品质、改良土壤的可持续生产技术,对保障产业健康发展具有重要意义。

多种绿色投入品在解决发展问题时展现出了应用潜力。氢在植物生理过程中发挥着重要作用。大量研究证实,氢气可通过促进内源氢气生成^[4]、调节抗氧化酶活性^[5]和维持离子氧化还原稳态^[6]等方式显著提高植物对低温、干旱和高盐等多种非生物胁迫的抗性。富氢水在植物生长发育中也发挥着关键作用,不仅能促进蔬菜种子发芽^[7]、幼苗^[8]及植株生长、改善作物品质,还能提升不同作物的经济效益,如延缓秋葵果实衰老^[9]、提升菠菜耐贮性^[10]。富氢水(Hydrogen-rich water)是氢气的一种替代形式,具有更易获取和更安全的特点^[11]。

微生物菌剂是由可共生且具有互补作用的人工培植微生物菌群混合制成的活性物质,有水剂、粉剂、固体剂等剂型,含有大量有益活菌及多种天

然发酵活性物质^[12]。它可以优化土壤菌群结构、抑制土壤中病原物的生长、减少农药使用量^[13]、增强作物抗逆性、促进养分吸收、提高产量与品质。前人研究表明,施用菌肥可显著改善辣椒^[14]、番茄^[15]等作物品质,降低病害率,提高产量。其中丛枝菌根真菌(AMF)被认为是自然界中最常见的菌根类型,能够与80%以上的陆生植物共生形成菌根共生体,以其为主要成分制成的微生物菌剂,在植物根际发挥重要作用^[16]。

生物刺激剂是具有双向调控作物新陈代谢作用,诱导产生抗胁迫机制,大幅度提高农作物产量、品质而又无害于环境、生态的相关物质^[17]。主要类型有多肽类、腐殖酸类、微生物及其代谢产物、壳聚糖类、蛋白质水解产物、海藻提取物、氨基酸类^[18]。生物刺激剂参与的农作物生理代谢过程有氧化还原反应、光合作用、呼吸作用、离子运输和核酸合成过程,其作用效果从植物体内到外部环境全方位展开,有利于果实品质和抗逆性的提升,在农业生产中具有巨大的应用潜力。

钙是构成植物细胞壁和质膜的重要成分,能维持膜结构和功能完整性、稳定细胞壁、促进光合产物转运、调节离子转运和细胞壁酶活性^[19],还作为细胞内第二信使参与信号转导,调节植物生殖生长、胁迫防御反应及细胞程序性死亡^[20]。钙肥在农业中应用广泛。在果树^[21]、水稻^[22]、马铃薯^[23]等多

种作物种植中,施用钙肥可有效提高作物产量和品质。甜菊苷是从甜叶菊(*Stevia rebaudiana*)中提取的白色至微黄色结晶性粉末或颗粒,是新型纯天然甜味剂,易溶于水及乙醇,甜度达蔗糖200~350倍,却几乎无热量且不参与糖代谢^[24],此外在制药后具有抑菌、抗炎和降血糖血脂血压等多种生物活性和保健功效^[25]。尽管甜菊苷对植物生长的影响研究较少,但现有研究表明,叶面喷施甜菊苷可提高樱桃番茄可溶性固形物、总糖及维生素C含量;甜菊苷可以促进植物对土壤的适应以及增强植物的养分吸收能力来促进根系生长和发育^[26]。

目前,现有研究多是单独施用一种物质来改善作物品质和土壤养分,对多种物质联合施用的效果研究较少。本研究在前人研究的基础上拟将富氨水、微生物菌剂和不同生物刺激剂进行组合,旨在探究复配施用对番茄生长发育、品质和土壤质量的影响,以期在生产上的品质提升技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用的番茄品种为‘京采8号’中小型番茄,该番茄购自京研益农(北京)种业科技有限公司。微生物菌剂由本实验室以丛枝菌根真菌为主要微生物配制而成,有益活菌数>2亿/g。有机钙为白色粉末,有效含量>90%。甜菊苷为黄褐色液体。

富氨水装置由北京氢润/玖龙氢科技有限公司提供,自来水通过装置处理后成为富氨水输出。富氨水机器中活性制氢装置的原料为60%~80%硅酸盐粘结剂、10%~20%电气石粉、5%~10%纳米稀土氧化物、5%~10%低温助熔剂和2%~10%远红外陶瓷粉。过滤系统的孔径范围为0.2~5 μm,中位孔径为0.5 μm。使用功率范围为50~100 W的流型紫外线管进行灭菌。

1.2 试验设计

本试验于2024年北京市通州区车屯蔬菜科技小院塑料大棚进行。设置春茬和秋茬2次种植茬口,春茬种植时间为4月初~7月末,留5穗果打顶;秋茬种植时间为8月末~11月末,留2穗果打顶。试验区属于暖温带半湿润半干旱季风气候区,夏季高温多雨(6~8月),冬季寒冷干燥,春秋季短促。降水季节分配不均匀,约80%的年降水量集中在夏季,呈现雨热同季特征。

本试验所用塑料大棚为南北走向,长70 m,宽10 m,面积约700 m²。

试验大棚土壤的基本理化性质:土壤pH为7.7,为弱碱性土壤。

种植前所有处理都施加鸡粪肥1 000 kg/667 m²,施用后充分旋耕土地。

1.2.1 微生物菌剂和富氨水联合施用试验

以自来水灌溉作为对照(CK₁),设置自来水+微生物菌剂(M)、富氨水+微生物菌剂(HM)在内的3个试验处理,3次重复。小区长4.6 m,宽9.0 m,面积41.4 m²,随机区组排列。在番茄定植前,对M和HM处理施用微生物菌剂作为基肥,施用方法为穴施,施用量3 g/穴。在番茄整个生长期内进行统一的环境调控和植株管理措施, HM处理中以富氨水灌溉替代常规灌溉水,每周灌溉2~3次,每次3 h。在番茄生长过程中,所有处理每2周追1次氮磷钾大量元素肥。

1.2.2 生物刺激剂和富氨水联合施用试验

在试验一的处理基础上添加生物刺激剂作为追肥,设计自来水灌溉且无其他处理(CK₂)、自来水+微生物菌剂+有机钙(MC)、自来水+微生物菌剂+甜菊苷(MK)、富氨水+微生物菌剂+有机钙(HMC)、富氨水+微生物菌剂+甜菊苷(HMK)共5个试验处理,共3次重复。甜菊苷(K)和有机钙(C)作为追肥在番茄开花坐果后随水冲施,施用量为每667 m²施用5 kg,每隔10 d用1次,连施2~3次。包含微生物菌剂的处理均在定植前穴施3 g菌剂作为底肥。包含富氨水的处理施用富氨水灌溉替代常规灌溉水,每周灌溉2~3次,每次3 h。在番茄生长过程中,所有处理每2周追1次氮磷钾大量元素肥。

1.3 测量指标及方法

1.3.1 番茄生长指标的测定

番茄定植缓苗后每隔一段时间测定植株的株高(番茄茎基部到番茄顶部生长点的距离)、茎粗(2、3片叶之间的茎粗)等生长指标,在闷尖后测定叶片数、叶绿素含量、节间距(株高与节间数的比值)和花序间距(第2、3花穗之间的茎长度)。为保证测定结果的准确性,每个处理随机选取15株番茄进行测量,结果取测量平均值。番茄拉秧后每个小区选取5株番茄带回实验室,将植株根、茎和叶分离,称鲜重后放入烘箱,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重后测定植株干重,计算生物量^[27]。

1.3.2 番茄果实品质的测定

番茄结果期,在各小区采收5个以上达到食用成熟度的番茄,测定果实果形指数和硬度;然后用榨汁机将果实样品充分混合均匀并打碎成番茄果浆后,测定果实维生素C含量(2,6-二氯酚滴定法)^[28]、可溶性糖含量(蒽酮比色法)^[28]、可滴定酸含量(0.05 mol/L NaOH滴定法)^[28]、可溶性固形物含量(折光计法)^[28],并计算糖酸比。每个处理3次重复,每个重复的结果取平均值。

1.3.3 番茄果实品质综合指数

鉴于番茄品质指标较多,单一指标无法准确地评价果实综合品质,因此引用实验室建立的番茄果实综合评价指数^[29]来评价番茄果实综合品质。首先对各指标进行无量纲处理,以消除各指标单位差异带来的影响。计算公式如下:

$$T=(y-m)/(s-m) \quad (1)$$

式中: T 为各指标无量纲化后得分值, y 表示实际测定值, s 和 m 分别表示每个指标中所测得的最大值和最小值。无量纲值均介于0~1。

番茄品质综合指标计算公式如下:

$$TQI=\sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

式中: TQI 为各指标得分值相加后的果实品质综合指数; T 为各指标得分值,由式(1)计算获得。

1.3.4 土壤指标的测定

拉秧后,在每个小区随机选择10个点取0~30 cm土壤,取样的土壤应均匀无团状的大颗粒,充分混匀后保存在自封袋中,待土壤自然风干后过2 mm网筛,测定土壤的pH(电位法)、EC值(电导法)、有机质(重铬酸钾氧化-容量法)、全氮(半微量凯氏法)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗指示剂比色法)、速效钾(醋酸铵浸提-火焰光度计法)^[28]。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2019软件进行数据记录、整理;采用SPSS Statistics 27.0软件进行单因素方差分析,并用Duncan法对具有差异显著性的数据多重比较, $P<0.05$ 表示差异显著;使用GraphPad Prism10进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 微生物菌剂和富氢水复配对番茄生长的影响

株高和茎粗等指标是番茄地上部生长最为直观的标志。在春茬番茄中,微生物菌剂处理(M)同

对照(CK_1)相比,定植15和30 d株高分别提高了10.58%和3.50%,定植50 d株高降低了2.02%,定植15、30和50 d的叶绿素含量分别提高了1.65%、12.60%和17.58%,节间长度降低了4.92%。微生物菌剂和富氢水复配(HM)在定植前期株高较 CK_1 、M处理分别提升了16.94%、5.76%,定植后期株高较其他处理相对降低,花序间距显著降低了6%($P<0.05$,表1)。在秋茬番茄中,微生物菌剂处理定植15和50 d茎粗分别提高了9.24%和33.80%,坐果率提升了13.51%。HM处理15 d株高较M和 CK_1 分别显著提高了26.13%、13.18%($P<0.05$),定植15、30和50 d的茎粗较 CK_1 显著提升了15.13%、21.90%和38.85%($P<0.05$),坐果率较M和 CK_1 显著提升了16.67%、32.43%($P<0.05$)。HM处理的效果具有明显优势:生长前期促进纵向生长,后期通过增加茎粗、缩短花序间距等优化株型,促进养分向生殖器官输送,同时提升叶绿素含量以增强光合效率,最终显著提高坐果率。表明该复配处理能有效协调番茄营养生长与生殖生长的平衡,利于保障番茄植株的生长稳定性、养分吸收与转化效率,为后期产量形成和果实品质提升奠定坚实基础。此外,秋茬中HM处理对茎粗和坐果率的提升幅度更大,说明其在不同茬口下的应用效果可能受到环境因素的影响。

2.2 微生物菌剂和富氢水复配对番茄品质的影响

春茬番茄品质测定结果表明(表2),M处理与 CK_1 相比第1、4、5穗果维生素C含量分别提高了16.61%、7.12%和27.08%,第1、2穗果可溶性固形物含量提高了3.32%和5.87%。HM处理与 CK_1 相比第1、4、5穗果维生素C含量分别显著提高了45.65%、44.06%和31.69%($P<0.05$),第1、2穗果可溶性固形物含量分别显著提高了4.98%和9.05%($P<0.05$);HM处理较M第1、4穗果维生素C含量分别提高了24.90%、20.13%,较第1、2穗果可溶性固形物含量分别提高了1.60%、3.00%。秋茬番茄品质测定表明,M处理使可溶性固形物含量和糖酸比与 CK_1 相比分别提高了6.06%和23.27%。HM处理较 CK_1 相比可溶性固形物含量和糖酸比分别显著提高了6.51%和54.61%,可滴定酸含量显著降低了32.28%($P<0.05$);HM处理与M相比维生素C含量、糖酸比分别显著提升了43.07%、25.42%($P<0.05$)。HM

表 1 不同处理对番茄植株茎叶生长的影响
Table 1 Effects of different treatments on stem and leaf growth of tomato plants

茬口 Stubble	处理 Treatment	株高/cm Plant height			茎粗/mm Stem diameter			叶片数 Leaf number	节间长度/cm Internodal length	坐果率/% Fruit setting rate
		15 d	30 d	50 d	15 d	30 d	50 d			
春茬 Spring stubble	CK ₁	26.38±1.36b	65.70±1.75ab	148.80±1.12a	8.09±0.22a	11.67±0.19a	12.94±0.15b	23.07±0.29a	6.50±0.09a	0.92±0.02a
	M	29.17±1.22ab	68.00±1.30a	145.80±0.98b	8.44±0.26a	11.51±0.30a	13.45±0.14a	23.87±0.20a	6.18±0.06ab	0.92±0.02a
	HM	30.85±1.17a	63.33±0.82b	139.93±0.94c	7.78±0.34a	11.15±0.08a	12.91±0.17b	23.62±0.48a	6.11±0.15b	0.93±0.02a
秋茬 Autumn stubble	CK ₁	23.37±1.16b	45.06±3.05a	98.41±2.48a	5.95±0.15b	6.62±0.29b	7.13±0.20b	16.83±0.30a	5.78±0.16a	0.74±0.04c
	M	20.97±0.63b	42.48±2.03a	100.51±2.41a	6.50±0.20a	6.88±0.32b	9.54±0.23a	17.50±0.29a	5.85±0.13a	0.84±0.03b
	HM	26.45±1.23a	48.81±2.33a	99.24±1.64a	6.85±0.17a	8.07±0.37a	9.90±0.19a	16.58±0.40a	6.22±0.16a	0.98±0.01a

注：CK₁为对照处理；M为微生物菌剂处理；HM为富氨水+微生物菌剂处理。同列数据上不同字母代表不同处理间的显著差异($P<0.05$)。每组处理3次重复,每次重复取15株样品测量。表2同。
Note: CK₁ represents the control treatment; M is the microbial inoculant treatment; HM is the hydrogen-rich water+Microbial inoculant treatment. Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). Each treatment had 3 replicates, and 15 plant samples were measured per replicate. The same as Table 2.

处理在春、秋茬番茄中均展现出优于M和CK₁品质的提升效果:春茬中侧重提高维生素C和可溶性固形物等营养成分,秋茬中则在增强营养的同时,显著优化糖酸比、降低酸度,更贴合果实风味改善的需求。这种协同效应可能源于微生物菌剂对土壤微环境的优化与富氨水抗氧化作用的结合,共同促进了植株对养分的吸收转化及果实中物质的积累。

番茄果实品质受多种因素综合影响,单一评价指标难以全面反映其品质优劣,需借助综合评价指数(TQI)进行系统性评估(表2)。与CK₁相比,HM处理的各穗番茄果实的TQI值均呈现不同程度的提升,差异未达到显著水平($P>0.05$)。这一结果初步表明,富氨水和微生物菌剂在改善番茄果实综合品质方面具有潜在作用,但其效果的稳定性和显著性仍需进一步研究验证。

2.3 微生物菌剂和富氨水复配对土壤理化性质的影响

微生物菌剂单独施用(M)和微生物菌剂与富氨水联合施用(HM)均能降低土壤pH和EC,同时提高速效磷、速效钾、全氮和有机质含量(图1)。其中,HM处理使pH和EC分别显著降低了4.99%和32.57%($P<0.05$),速效磷、速效钾和全氮含量分

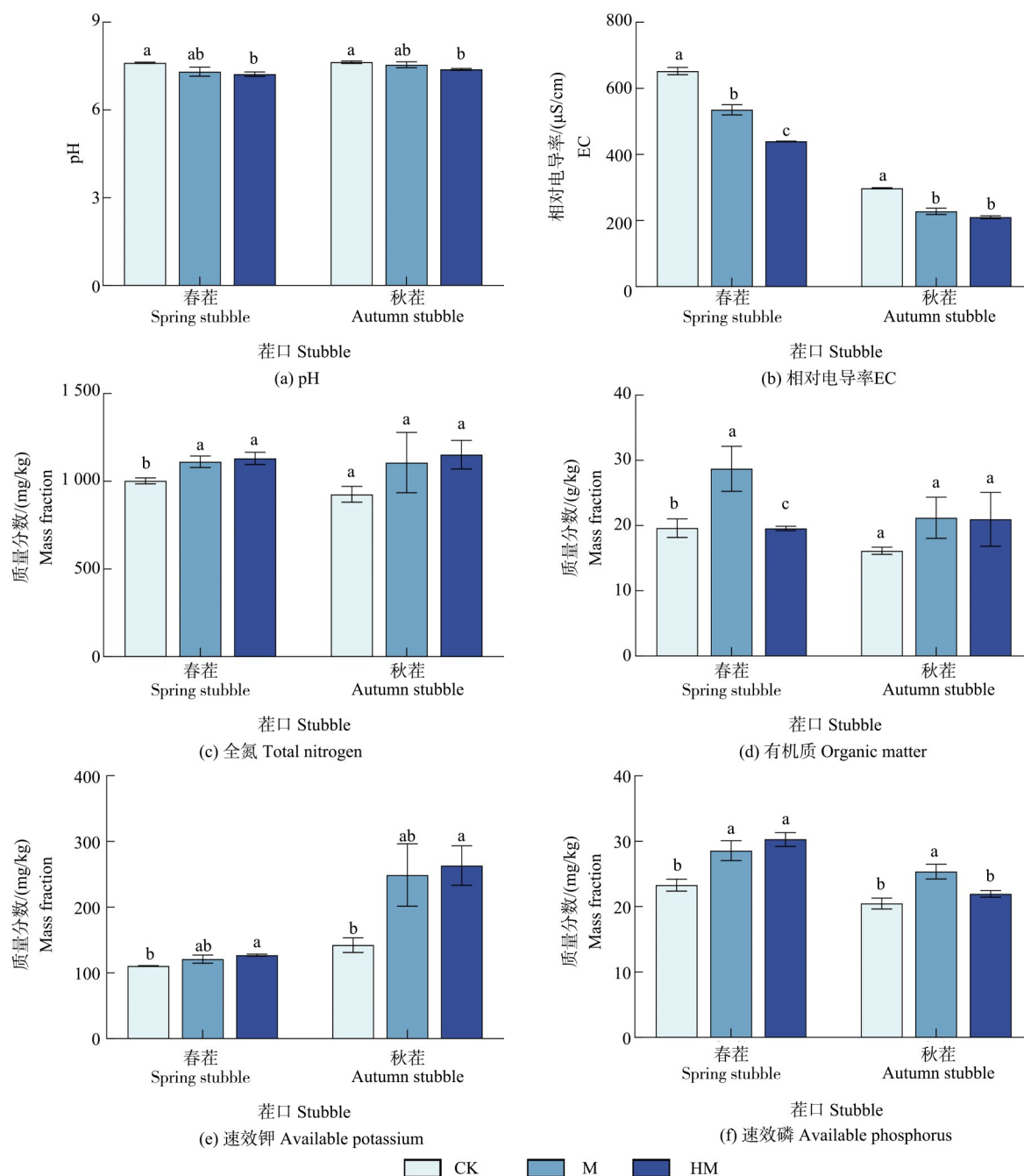
别提高了30.04%、12.79%和14.76%。在秋茬土壤中,M和HM处理同样降低了土壤pH、EC,HM处理的效果依旧突出,使pH和EC分别降低了3.14%和29.33%。M处理使速效磷和速效钾含量分别提升23.72%、74.94%,而HM处理进一步将速效钾含量提升至85.01%,体现出富氨水与微生物菌剂的协同作用对钾素活化的增效效应。HM处理在春、秋茬中均展现出优于M处理的土壤改良效果,即可通过降低pH和EC,缓解土壤盐渍化和酸化问题,改善根系生长环境;又通过提升速效养分和全氮、有机质含量,增强土壤肥力,为番茄生长提供持续稳定的养分供给。

2.4 生物刺激剂和富氨水复配对番茄生长的影响

春茬番茄不同处理的生长指标呈现阶段性差异(表3),其中富氨水+微生物菌剂+有机钙处理(HMC)表现突出。定植15d,HMC处理和富氨水+微生物菌剂+甜菊苷处理(HMK)处理的株高显著提高了23.39%和22.02%($P<0.05$),说明这2种处理在生长前期纵向生长明显,HMC处理节间长度较CK₂缩短约2.8%,利于株型紧凑;而HMK处理因节间长度增加9.1%可能导致株型松散。秋茬番茄中,HMC处理的优势更为显著,是表现最佳

表 2 不同处理对番茄植株果实品质的影响
Table 2 Effects of different treatments on fruit quality of tomato plants

茬口 Stubble	果位 Bearing position	处理 Treatment	果形指数 Fruit type index	维生素C质量 分数/(mg/kg) Vitamin C mass fraction	可溶性固形物 含量/% Soluble solid content	可溶性糖质量 分数/(mg/g) Soluble sugar mass fraction	可滴定酸质量 分数/(mg/g) Titratable Acid mass fraction	糖酸比 Sugar-acid ratio	果实品质综 合指数 Comprehensive index of fruit quality
春茬 Spring stubble	第1穗果 First truss fruit	CK ₁	0.82±0.02a	42.50±4.91b	6.03±0.03b	37.97±1.62a	6.03±0.39a	6.31±0.14a	2.14±0.45a
		M	0.80±0.02a	49.56±1.76ab	6.23±0.03ab	34.30±2.42a	5.58±0.22a	6.17±0.56a	2.46±0.34a
		HM	0.83±0.02a	61.90±1.53a	6.33±0.07a	35.49±3.64a	6.48±0.81a	5.69±0.96a	3.53±0.58a
	第2穗果 Second truss fruit	CK ₁	0.80±0.01a	75.13±8.08a	6.30±0.06b	35.82±0.90a	5.03±0.19a	7.16±0.45a	1.21±0.30a
		M	0.81±0.01a	75.13±10.69a	6.67±0.07ab	42.74±5.01a	4.91±0.22a	8.82±1.35a	2.28±0.63a
		HM	0.80±0.01a	78.66±6.36a	6.87±0.12a	38.56±0.21a	5.47±0.11a	7.05±0.16a	2.52±0.12a
	第3穗果 Third truss fruit	CK ₁	0.81±0.01a	75.13±0.01a	7.30±0.06a	58.02±6.26a	3.57±0.59a	16.79±2.38a	2.40±0.48ab
		M	0.83±0.01a	91.89±6.17a	7.10±0.01ab	54.30±2.46a	3.13±0.45a	18.21±2.95a	2.50±0.31a
		HM	0.81±0.01a	86.60±6.89a	6.90±0.10b	44.50±3.84a	2.90±0.22a	15.31±0.17a	1.26±0.14b
	第4穗果 Fourth truss fruit	CK ₁	0.84±0.02a	61.90±4.58b	6.50±0.23a	55.00±5.63a	4.02±0.67a	13.95±0.83a	1.49±0.28a
		M	0.87±0.02a	66.31±3.84ab	6.63±0.28a	61.85±2.17a	3.80±0.22a	16.46±1.50a	2.31±0.57a
		HM	0.86±0.01a	78.66±4.41a	6.50±0.12a	62.09±6.99a	4.02±0.39a	15.46±1.13a	2.59±0.57a
	第5穗果 Fifth truss fruit	CK ₁	0.88±0.02a	57.05±6.50b	6.23±0.18a	62.87±5.39a	4.02±0.01a	15.64±1.34a	2.19±0.16a
		M	0.90±0.01a	82.19±6.17a	6.67±0.18a	54.21±3.58a	3.91±0.11a	13.91±1.13a	2.48±0.07a
		HM	0.88±0.01a	75.13±5.51ab	6.43±0.09a	53.97±6.80a	4.24±0.22a	12.64±1.01a	2.27±0.69a
秋茬 Autumn stubble		CK ₁	0.88±0.04a	38.98±0.88a	6.60±0.06b	32.92±2.33a	7.59±0.59a	4.34±0.16c	2.37±0.45a
		M	0.86±0.03a	26.63±1.76b	7.00±0.15a	29.75±2.73a	5.58±0.59b	5.35±0.10b	1.73±0.54a
		HM	0.81±0.04a	38.10±3.05a	7.03±0.07a	34.37±0.72a	5.14±0.22b	6.71±0.19a	3.21±0.17a



每个处理包含 3 次生物学重复, 每次生物学重复包含 5 个样本(平均值 $\pm$ 标准差, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)后进行邓肯氏检验)。小写字母表示显著差异($P < 0.05$)。图 2 同。CK: 对照; M: 蒸馏水+微生物菌剂; HM: 富氨水+微生物菌剂。

Each treatment includes 3 biological replicates, each biological replicate consists of 5 samples (mean $\pm$ SD, one-way ANOVA followed by Duncan's test). Lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same as Figure 2. CK: Control; M: Distilled water+Microbial inoculant; HM: Hydrogen-rich water+Microbial inoculant.

图 1 不同处理对土壤理化性质的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties

的处理。株高方面, 定植 15 d 时 HMC 处理较 CK₂ 提高约 5.9%, 30 d 提高约 9.4%, 全生长期纵向生长促进作用明显; 茎粗上, 各时期均表现优异, 定植 50 d 茎粗较 CK₂ 提高约 42.1%, 茎秆健壮生长, 增强

支撑能力, 效果优于 HMK。坐果率上, M、MK、HMC 和 HMK 处理分别较 CK₂ 提高约 21.6%、27.0%、24.3% 和 24.3%, 坐果率提升, 生殖生长优势明显。

综合来看,HMC处理在2茬番茄生长中整体表现最优。春茬中,HMC前期株高提升显著且株型紧凑,利于快速构建生长框架;秋茬中,HMC处理整体优势更明显,其全期株高提升稳定,茎粗提升尤为显著,株型紧凑且坐果率提升显著,兼顾植株健壮与坐果效率,以实现番茄优质高产。

表3 不同处理对番茄植株茎叶生长的影响
Table 3 Effects of different treatments on stem and leaf growth of tomato plants

茬口 Stubble	处理 Treatment	株高/cm Plant height			茎粗/mm Stem diameter			叶片数 Leaf number	节间长度/cm Internodal length	坐果率/% Fruit setting rate
		15 d	30 d	50 d	15 d	30 d	50 d			
春茬 Spring stubble	CK ₂	26.38±1.36b	65.70±1.75ab	148.80±1.12a	8.09±0.22a	11.67±0.19a	12.94±0.15b	23.07±0.29b	6.50±0.09b	0.92±0.02a
	MC	27.52±1.3bc	70.97±1.46a	154.36±1.41a	8.23±0.19a	11.76±0.35a	13.80±0.19a	23.73±0.21ab	6.58±0.09b	0.92±0.02a
	MK	29.52±1.22abc	67.50±1.43ab	155.35±0.69a	8.49±0.27a	11.40±0.25a	13.33±0.14ab	23.91±0.20a	6.53±0.06b	0.92±0.02a
	HMC	32.55±0.77a	63.97±0.92b	143.35±1.37c	7.98±0.16a	11.16±0.08a	12.97±0.24b	23.18±0.24b	6.32±0.10b	0.92±0.02a
	HMK	32.17±1.21a	65.73±1.48ab	154.37±0.73a	8.10±0.27a	11.17±0.07a	12.91±0.15b	22.18±0.21c	7.09±0.09a	0.93±0.02a
秋茬 Autumn stubble	CK ₂	23.37±1.16ab	45.06±3.05a	98.41±2.48a	5.95±0.15c	6.62±0.29b	7.13±0.20b	16.83±0.30ab	5.78±0.16a	0.74±0.04b
	MC	20.27±0.69c	43.07±1.59a	100.04±1.98a	6.61±0.27b	7.11±0.27ab	9.54±0.27a	16.50±0.34b	6.20±0.16a	0.90±0.02a
	MK	21.91±0.77bc	44.32±2.58a	99.34±2.09a	6.55±0.18bc	7.00±0.20ab	9.97±0.29a	17.67±0.26a	5.76±0.10a	0.94±0.02a
	HMC	24.76±0.89a	49.29±1.50a	100.03±1.82a	7.28±0.28a	7.72±0.24a	10.13±0.15a	17.42±0.43ab	5.98±0.16a	0.92±0.02a
	HMK	23.33±0.88ab	48.08±2.28a	104.34±1.91a	6.86±0.21ab	7.73±0.22a	10.20±0.24a	17.27±0.38ab	6.07±0.12a	0.92±0.02a

注:CK₂为对照处理;MC为微生物菌剂+有机钙处理;MK为微生物菌剂+甜菊苷处理;HMC为富氢水+微生物菌剂+有机钙处理;HMK为富氢水+微生物菌剂+甜菊苷处理。同列数据上不同字母代表不同处理间的显著差异($P<0.05$)。每组处理3次重复,每次重复取15株样品测量。表4同。
Note: CK₂ represents the control treatment; MC is the microbial inoculant+Organic calcium treatment; MK is the microbial inoculant+Stevioside treatment; HMC is the hydrogen-rich water+Microbial inoculant+Organic calcium treatment; HMK is the hydrogen-rich water+Microbial inoculant+Stevioside treatment. Different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). Each treatment had 3 replicates, and 15 samples were measured per replicate. The same as Table 4.

2.5 生物刺激剂和富氢水复配对番茄品质的影响

春茬番茄不同处理的果实品质指标呈现显著差异(表4)。HMC处理表现最优,第1穗果的维生素C含量较CK₂显著提高了49.8%($P<0.05$),可溶性固形物提升了6.1%,糖酸比提升了13.8%;果实品质综合指数显著提升了104.4%($P<0.05$),综合品质优势明显。在后续的第2至5穗果中,HMC处理在维C含量上较CK₂多有提升,但在可溶性固形物、糖酸比及TQI等指标上表现不稳定。秋茬番茄中,MC处理表

现较为突出,较CK₂维C含量提升约13.6%、可溶性固形物提升11.1%、糖酸比提升23.4%、TQI提升76.02%。HMC处理较CK₂相比可溶性固形物提升了4.55%、糖酸比提升约12.44%。
综合来看,春茬中,HMC处理在第1穗果的维C含量、可溶性固形物和糖酸比上有一定提升,但在第2、3、4穗果的部分指标表现不如CK₂或其他处理;秋茬中,MC处理在多个品质指标上有明显提升,HMC处理部分指标也有改善。

表 4 不同处理对番茄植株果实品质的影响

Table 4 Effects of different treatments on fruit quality of tomato plants

茬口 Stubble	果位 Bearing position	处理 Treatment	维生素 C 质量 分数/(mg/kg) Vitamin C mass fraction	可溶性固形物 含量/% Soluble solid content	可溶性糖质量 分数/(mg/g) Soluble sugar mass fraction	可滴定酸质量 分数/(mg/g) Titratable acid mass fraction	糖酸比 Sugar-acid ratio	果实品质 综合指数 Comprehe nsive index of fruit quality
春茬 Spring stubble	第 1 穗果 First truss fruit	CK ₂	42.50±	6.03±	37.97±	6.03±	6.31±	1.80±
			4.91b	0.03bc	1.62ab	0.39a	0.14a	0.34b
		MC	51.32±	6.13±	37.93±	5.14±	7.34±	2.20±
			1.53b	0.03b	4.45ab	0.22b	0.59a	0.64b
		MK	52.20±	5.97±	34.01±	5.14±	6.63±	1.37±
			1.76b	0.03c	2.05b	0.11b	0.44a	0.28b
		HMC	63.67±	6.40±	43.31±	6.03±	7.18±	3.68±
			2.33a	0.06a	0.68a	0.01a	0.11a	0.06a
		HMK	64.55±	6.07±	33.26±	5.03±	6.63±	1.74±
			4.58a	0.03bc	0.84b	0.19b	0.09a	0.18b
	第 2 穗果 Second truss fruit	CK ₂	75.13±	6.30±	35.82±	5.03±	7.16±	3.17±
			8.08ab	0.06ab	0.90a	0.19a	0.45a	0.45a
		MC	60.14±	6.07±	30.95±	4.91±	6.35±	1.52±
			4.41b	0.12b	0.95b	0.30a	0.50a	0.39b
		MK	76.01±	6.40±	31.70±	4.58±	7.01±	2.60±
			3.84ab	0.06a	1.24b	0.30a	0.67a	0.12ab
		HMC	76.01±	6.40±	31.77±	5.03±	6.34±	2.59±
			4.91ab	0.06a	0.41b	0.19a	0.28a	0.13ab
		HMK	83.95±	6.30±	32.97±	5.25±	6.38±	2.88±
			5.36a	0.10ab	1.14ab	0.49a	0.56a	0.43a
	第 3 穗果 Third truss fruit	CK ₂	75.13±	7.30±	58.02±	3.57±	16.79±	2.48±
			0.01b	0.06a	6.26a	0.59a	2.38a	0.40a
		MC	88.36±	7.00±	48.34±	2.90±	16.73±	2.19±
			2.65a	0.45a	2.29ab	0.22a	0.64a	0.47a
		MK	90.12±	6.80±	45.96±	3.24±	14.23±	2.03±
			4.67a	0.26a	4.37ab	0.11a	1.44a	0.56a
		HMC	78.66±	6.73±	44.58±	3.13±	14.60±	1.49±
			0.88b	0.09a	3.91ab	0.22a	2.44a	0.25a
		HMK	76.02±	6.83±	42.07±	3.24±	13.36±	1.33±
			1.76b	0.38a	3.85b	0.30a	2.15a	0.25a
	第 4 穗果 Fourth truss fruit	CK ₂	61.90±	6.50±	55.00±	4.02±	13.95±	1.78±
			4.58b	0.23a	5.63a	0.67a	0.83a	0.27a
		MC	83.07±	6.57±	57.13±	3.57±	16.29±	2.59±
			1.53a	0.03a	6.40a	0.22a	2.60a	0.45a
		MK	77.78±	6.70±	51.35±	3.35±	15.33±	2.14±
			1.53a	0.17a	5.51a	0.01a	1.64a	0.51a
		HMC	84.83±	6.50±	55.89±	3.91±	14.25±	2.42±
			4.91a	0.15a	5.60a	0.30a	0.43a	0.56a

表4 (续)

第5穗果 Fifth truss fruit	HMK	83.95± 1.76a	6.73± 0.13a	57.40± 1.57a	3.57± 0.40a	16.41± 1.55a	2.82± 0.28a
	CK ₂	57.05± 6.50b	6.23± 0.18a	62.87± 5.39a	4.02± 0.01b	15.64± 1.34ab	2.27± 0.10a
	MC	82.19± 5.78a	6.43± 0.13a	53.57± 6.63a	3.13± 0.11c	17.29± 2.58a	2.39± 0.46a
	MK	79.10± 3.82a	6.17± 0.20a	59.53± 6.67a	4.24± 0.22b	14.11± 1.81ab	2.49± 0.47a
	HMC	86.60± 6.89a	6.27± 0.29a	51.52± 7.47a	4.91± 0.22a	10.57± 1.78b	2.50± 0.62a
	HMK	71.60± 1.76ab	6.40± 0.06a	54.46± 2.17a	4.47± 0.22ab	12.28± 0.95ab	2.38± 0.07a
秋茬 Autumn stubble	CK ₂	38.98± 0.88ab	6.60± 0.06d	32.92± 2.33a	7.59± 0.59a	4.34± 0.16b	1.74± 0.40a
	MC	44.27± 2.33a	7.30± 0.01a	33.99± 2.85a	6.25± 0.22b	5.44± 0.44ab	3.01± 0.47a
	MK	27.51± 0.01d	7.10± 0.06b	36.89± 3.28a	6.70± 0.39ab	5.56± 0.63ab	2.35± 0.39a
	HMC	33.69± 3.18bc	6.90± 0.01c	31.52± 1.65a	6.48± 0.22ab	4.88± 0.33ab	1.67± 0.36a
	HMK	30.16± 0.01cd	7.07± 0.07b	33.77± 2.28a	5.58± 0.22b	6.04± 0.20a	2.10± 0.37a

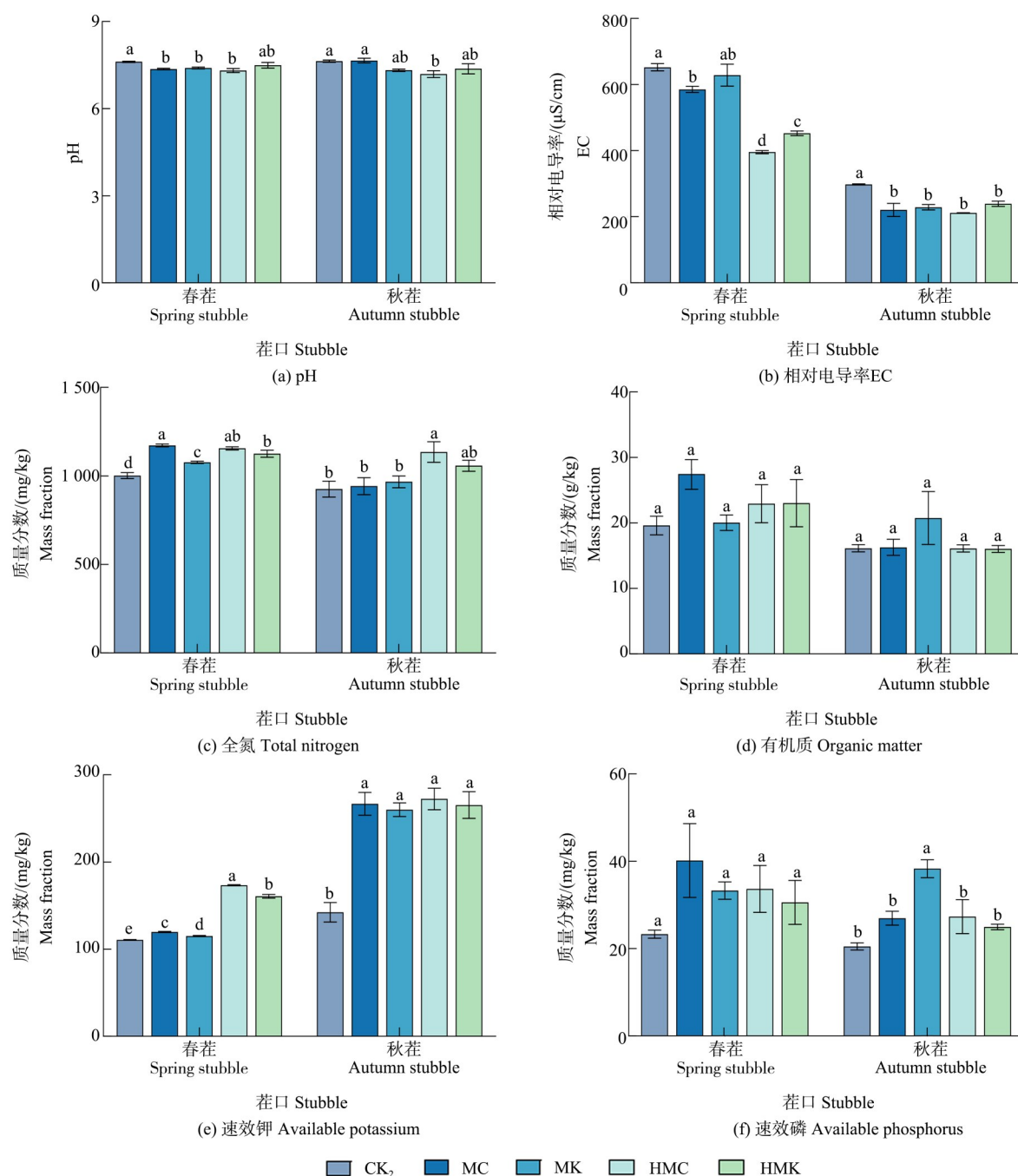
2.6 生物刺激剂和富氢水复配对土壤理化性质的影响

在土壤 pH 和电导率方面,春茬与秋茬存在差异。HMC 处理作用效果最好,显著降低了土壤 pH 和 EC 值($P<0.05$),春茬 pH 和 EC 分别降低了 3.94% 和 39.37%,秋茬分别降低了 5.77% 和 28.8%(图 2)。菌剂和生物刺激剂提高了土壤全氮含量,其中 HMC 处理效果最佳,使春茬和秋茬的全氮含量分别显著提高 15.32% 和 22.65% ($P<0.05$)。土壤速效磷含量在不同处理下的春茬和秋茬数据差异明显,速效钾含量同样受到不同处理影响,HMC 处理使春茬和秋茬的速效钾含量分别提高了 56.62% 和 91.34%。综合而言,HMC 处理在调节土壤酸碱度、降低电导率以及提升土壤关键养分含量上都有良好表现,对改善土壤理化性质,促进番茄植株健康生长、提高果实产量和品质都具有积极意义。

3 讨论与结论

本研究中,微生物菌剂单独施用及其与富氢水联合施用对番茄植株生长调控及土壤改良具有协

同增效作用。微生物菌剂单独施用和与富氢水联合施用均显著促进了番茄的生长。其中微生物菌剂和富氢水的联合施用在定植初期对株高的提升效果更为显著,但生长后期株高增速减缓、茎粗增加,表明富氢水可能通过调节植物内源激素平衡,优化了营养生长与生殖生长的分配,这一现象与 Xu 等^[30]的研究结果一致,调节植物氧化还原状态影响生长激素的合成与分配。除了调节植物内源激素平衡外,微生物菌剂中的有益菌群与富氢水还存在着更为复杂的相互作用。富氢水中氢离子富集,而北方土壤多为弱碱性或碱性土壤^[31],富氢水灌溉后中和土壤碱性,降低 pH 和 EC 值。适宜的 pH 和 EC 值有利于更多有益微生物的生长繁殖,从而形成更稳定的土壤生态系统^[32]。为丛枝菌根真菌提供了适宜的生存环境,促进了其增殖和代谢活动^[33],从而更有效地生成更多的菌丝附着植株根系、分解土壤有机物,为番茄植株提供更多的营养物质^[34]。番茄根系的生长环境得到改善,根系可以更健康地生长,增加对养分的吸收面积和效率^[35]。同时,这种协同作用可能具有一定的普遍性和特殊性,在不同土壤类型和气候条件下表现出不同的效果。在肥



CK₂:对照;MC:蒸馏水+微生物菌剂+有机钙;MK:蒸馏水+微生物菌剂+甜菊苷;HMC:富氨水+微生物菌剂+有机钙;HMK:富氨水+微生物菌剂+甜菊苷。

CK₂: Control; MC: Distilled water+Microbial inoculant+Organic calcium; MK: Distilled water+Microbial inoculant+Stevioside; HMC: Hydrogen-rich water+Microbial inoculant+Organic calcium; HMK: Hydrogen-rich water+Microbial inoculant+Stevioside.

图2 不同处理对土壤理化性质的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties

沃的土壤中,微生物菌剂与富氨水的协同作用可能更侧重于优化土壤环境^[36];而在贫瘠的土壤中,可能更侧重于促进养分的释放和吸收。长期来看,这有助于提高土壤的可持续利用能力,减少土壤退化

的风险^[37]。

在果实品质方面,富氨水和微生物菌剂的联合施用显著提高了果实的维生素C和可溶性固形物含量,可能源于富氨水对超氧化物歧化酶(SOD)、过

氧化物酶(POD)等相关酶活性的提升效果^[33],通过减少自由基对维生素C的氧化分解,从而增加其含量;而可溶性固形物含量的提高可能与富氢水促进光合作用产物的合成与运输有关^[38]。富氢水可能通过提高叶绿体的光合效率,增加碳水化合物的合成,同时促进糖分在植物体内的运输和分配,使更多的糖分积累在果实中^[30]。此外,微生物菌剂可以通过改善根际微环境,促进根系发育、养分的吸收与转运,从而促进植物生长、提升果实品质^[14]。本研究土壤环境分析表明,微生物菌剂单独施用和与富氢水联合施用显著降低土壤pH和EC值,缓解土壤盐渍化,改善土壤环境,其可能是通过微生物代谢产生有机酸或者富氢水产生氢离子从而调节离子平衡实现pH和EC值的降低^[30]。同时,微生物菌剂与富氢水联合施用处理显著提高了速效磷和速效钾,表明微生物菌剂与富氢水协同增强了土壤养分活化能力,这与潘妮等^[38]的研究结果一致。值得注意的是,微生物菌剂单独施用对土壤有机质的提升效果优于与富氢水联合施用,可能与富氢水加速有机质矿化有关。

在添加微生物菌剂的基础上进一步引入有机钙和甜菊苷,探究其与富氢水的协同效应。结果表明,生物刺激剂和富氢水的复配处理对番茄生长具有显著的促进作用,但其效果因生长阶段和处理组合不同而有所不同。富氢水+微生物菌剂+有机钙(HMC)和富氢水+微生物菌剂+甜菊苷(HMK)处理在不同生长阶段和茬口的表现,反映了有机钙和甜菊苷不同的作用特点。有机钙主要参与细胞壁的形成和维持细胞结构稳定,在植物生长前期,充足的有机钙供应可以增强细胞壁的稳定性和促进细胞的分裂和伸长,从而对茎粗增加和植株健壮性提升的作用更明显^[39]。而甜菊苷可能通过调控根系发育^[26],促进了养分的吸收并影响植物的生理代谢过程,如调节糖分运输和分配,从而在果实品质改善方面发挥作用。在果实品质方面,HMC处理显著提高了第1、4、5穗果的维生素C含量,而HMK处理则显著提升了第1穗果的可溶性固形物含量($P<0.05$)。研究结果与王子凡等^[40]的研究一致,表明钙肥和甜菊苷可通过不同的生理途径改善番茄品质。且所有处理均降低了秋茬果实可滴定酸含量,提高了糖酸比,改善了番茄的口感。生物刺激剂和富氢水复配显著改善了土壤的理化性质。

HMC处理均显著降低了土壤pH和EC值,表明富氢水与有机钙的复配可能通过调节土壤微生物群落结构,促进了有机酸的分泌,降低了土壤的盐分含量^[41]。此外,所有处理均显著提高了土壤速效钾含量,其中HMC处理在春茬中比对照提高了56.62%。钾是植物生长发育的关键元素,其有效性的提高可能与微生物菌剂通过解钾作用释放了土壤中的固定态钾有关^[42]。

本研究中富氢水与微生物菌剂复配(HM)可有效协调番茄营养生长与生殖生长,显著提升春茬定植初期株高、秋茬茎粗和坐果率($P<0.05$),改善果实维生素C和可溶性固形物含量,并通过降低土壤pH、EC值及提升速效磷、全氮含量改良土壤环境,为番茄生长提供有利条件。生物刺激剂的加入可进一步增强协同效应,其中富氢水+微生物菌剂+有机钙(HMC)处理表现最优;较CK₂及其他处理显著提高春茬果实维生素C含量和两茬土壤速效钾、全氮含量($P<0.05$),显著降低土壤pH和EC值($P<0.05$),同时促进植株茎粗增长和多穗位果实品质提升,综合效果优于HMK处理。不同茬口结果差异表明,环境因子(如温度、光照等)可能影响处理效果,秋茬中HMC对土壤速效钾的提升幅度高于春茬,表明生产中需根据茬口特点优化施用方案。综上,富氢水与微生物菌剂复配是改善设施番茄生长、品质及土壤的有效措施,联合施用有机钙可进一步增强效果,为设施番茄优质高效生产及土壤可持续利用提供了可行的技术参考。

参考文献 References

- [1] 惠成章,孙永生,赵丽丽,刘爱群.我国蔬菜产业发展研究[J].现代农业科技,2024(10):180-182,197
Hui C Z, Sun Y S, Zhao L L, Liu A Q. Research on development of vegetable industry in China[J]. *XianDai NongYe KeJi*, 2024(10): 180-182, 197 (in Chinese)
- [2] 蒋步国,胡珍珍,刘登峰,朱强林,李宁,李国峰,鲍恩财.设施番茄生产机械化技术发展研究[J].农业开发与装备,2024(7):58-61
Jiang B G, Hu Z Z, Liu D F, Zhu Q L, Li N, Li G F, Bao E C. Study on the development of mechanization technology of protected tomato production[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2024(7): 58-61 (in Chinese)
- [3] 杨旭英,王世江.三大技术破解设施蔬菜土壤连作障碍[J].长江蔬菜,2024(11):44-46
Yang X Y, Wang S J. Three major techniques to solve obstacle of continuous cropping of facility vegetable soil[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2024(11): 44-46 (in Chinese)
- [4] Jin Q J, Zhu K K, Cui W T, Xie Y J, Han B, Shen W B. Hydrogen gas acts as a novel bioactive molecule in enhancing plant tolerance to paraquat-induced

- oxidative stress via the modulation of heme oxygenase-1 signalling system[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(5): 956-969
- [5] Fu X M, Ma L, Gui R F, Li Y Z. Hydrogen rich water (HRW) induces plant growth and physiological attributes in fragrant rice varieties under salt stress [J]. *Research Square*, 2020, 1: 1-24
- [6] 江宜龙. 富氨水缓解冻害和盐胁迫对水稻幼苗氧化伤害及种子萌发的抑制[D]. 南京:南京农业大学, 2014
- Jiang Y L. Hydrogen-rich water alleviates freeze-induced seedlings oxidative damage and salt-triggered seed germination inhibition in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [7] 李嘉炜, 陈潇, 张晶, 司雨, 刘诗华, 李湘妮, 张白鸽. 富氨水在蔬菜育苗中的应用技术研究[J]. *种子科技*, 2022, 40(15): 5-8
- Li J W, Chen X, Zhang J, Si Y, Liu S H, Li X N, Zhang B G. Study on application technology of hydrogen-rich water in vegetable seedling raising [J]. *Seed Science & Technology*, 2022, 40(15): 5-8 (in Chinese)
- [8] 马南行. 富氨水对油菜生长及生理特性的影响[J]. *现代农业科技*, 2023(13): 80-82, 86
- Ma N X. Effects of hydrogen-rich water on growth and physiological characteristics of rape[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(13): 80-82, 86 (in Chinese)
- [9] Dong W Q, Cao S F, Zhou Q H, Jin S W, Zhou C J, Liu Q L, Li X, Chen W, Yang Z F, Shi L Y. Hydrogen-rich water treatment increased several phytohormones and prolonged the shelf life in postharvest okras[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1108515
- [10] 徐超, 秦占军, 陈依梁, 史君彦, 封碧红, 王清. 富氨水处理对菠菜采后贮藏品质的影响[J]. *北方园艺*, 2023(8): 78-87
- Xu C, Qin Z J, Chen Y L, Shi J Y, Feng B H, Wang Q. Effects of hydrogen rich water treatment on postharvest storage quality of spinach[J]. *Northern Horticulture*, 2023(8): 78-87 (in Chinese)
- [11] Dong B Y, Zhu D Q, Yao Q P, Tang H M, Ding X C. Hydrogen-rich water treatment maintains the quality of *Rosa sterilis* fruit by regulating antioxidant capacity and energy metabolism[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113361
- [12] 王其传, 孙锦, 束胜, 李晶, 郭世荣, 祁红英, 陈月珍. 微生物菌剂对日光温室辣椒生长和光合特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(6): 7-12
- Wang Q C, Sun J, Shu S, Li J, Guo S R, Qi H Y, Chen Y Z. Effects of microbial agents on growth and photosynthesis of pepper in solar greenhouse [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(6): 7-12 (in Chinese)
- [13] 王若靖. 生物有机肥对草莓促生作用及主要病害防治效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
- Wang R J. Study on Growth promoting effect of bio organic fertilizer on strawberry and control effect of main diseases[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022 (in Chinese)
- [14] 王赫, 李晓雪, 王亚玲, 刘文菊, 陆秀君, 李博文. 化肥减量配施有机肥和菌剂对辣椒产量、品质和养分累积的影响[J]. *北方园艺*, 2021(16): 1-7
- Wang H, Li X X, Wang Y L, Liu W J, Lu X J, Li B W. Effects of reduced chemical fertilizer combined application of organic fertilizers and microbial inoculants on yield, quality and nutrient accumulation in chili pepper[J]. *Northern Horticulture*, 2021(16): 1-7 (in Chinese)
- [15] 黄侃. 生物有机肥对番茄产量及品质的影响[J]. *农业技术与装备*, 2024(4): 181-183
- Huang K. Effect of bio-organic fertilizer on yield and quality of tomato[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2024(4): 181-183 (in Chinese)
- [16] Smith S E, Smith F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62: 227-250
- [17] 陈绍荣. 我国生物刺激剂的产业现状及发展方向[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32(1): 16-18, 32
- Chen S R. Industry status and development direction of bio stimulants in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2017, 32(1): 16-18, 32 (in Chinese)
- [18] Tuna A L, Kaya C, Ashraf M, Altunlu H, Yokas I, Yagmur B. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 173-178
- [19] Gong M, Cao Z X. The role of calcium in plant cell signal transduction[J]. *Plant Magazine*, 1991(3): 29-30
- [20] Nazir M M, Li G L, Nawaz M, Noman M, Zulfikar F, Ahmed T, Jalil S, Ijaz M, Kuzyakov Y, Du D L. Ionic and nano calcium to reduce cadmium and arsenic toxicity in plants: Review of mechanisms and potentials[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 216: 109169
- [21] 李钰. 生物活性有机钙肥对红富士苹果品质的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2020, 51(6): 61-63
- Li Y. Effect of bioactive organic calcium fertilizer on quality of red fuji apple [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2020, 51(6): 61-63 (in Chinese)
- [22] Yuan S, Han Y, Cui C, Chen P P, Tu N M, Rang Z W, Yi Z X. Silicon - calcium fertilizer increased rice yield and quality by improving soil health[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 13088
- [23] 赵性宝, 曹孔元. 钙肥对马铃薯产量的影响[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(28): 37-38
- Zhao X B, Cao K Y. Effects of calcium fertilizer on the yield of potatoes[J]. *Applied Engineering Technology*, 2023, 43(28): 37-38 (in Chinese)
- [24] Díaz-Gutiérrez C, Hurtado A, Ortíz A, Poschenrieder C, Arroyave C, Peláez C. Increase in steviol glycosides production from *Stevia rebaudiana* Bertoni under organo-mineral fertilization[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 147: 112220
- [25] 李亚辉, 罗敏花, 高庆超, 潘超, 施露, 梁颖, 张志勇. 甜叶菊主要功能性成分研究进展[J]. *中国糖料*, 2023, 45(2): 33-40
- Li Y H, Luo M H, Gao Q C, Pan C, Shi L, Liang Y, Zhang Z Y. Recent progress on main functional components of *Stevia rebaudiana* bertoni[J]. *Sugar Crops of China*, 2023, 45(2): 33-40 (in Chinese)
- [26] Saravanan K, Vidya N, Halka J, Priyanka Preethi R, Appunu C, Radhakrishnan R, Arun M. Exogenous application of stevioside enhances root growth promotion in soybean (*Glycine max* (L) Merrill)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, 201: 107881
- [27] Togun A O, Akanbi W B. Comparative effectiveness of organic-based fertilizer to mineral fertilizer on tomato growth and fruit yield[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(4): 337-342
- [28] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- Gao J F. *Experimental Technology of Plant Physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [29] 宋梦圆, 宁国法, 田永强, 高丽红. 不同成熟度番茄果实在贮藏期间的品质变化[J]. *中国蔬菜*, 2023(2): 45-50
- Song M Y, Ning G F, Tian Y Q, Gao L H. Quality changes of tomato fruits with different maturity during storage[J]. *China Vegetables*, 2023(2): 45-50 (in Chinese)
- [30] Xu S, Zhu S S, Jiang Y L, Wang N, Wang R, Shen W B, Yang J. Hydrogen-rich water alleviates salt stress in rice during seed germination[J]. *Plant and Soil*, 2013, 370(1): 47-57
- [31] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, Li D C, Yang J L, Song X D, Shi Z, Zhu A X,

- Zhang G L. Mapping high resolution national soil information grids of China [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340
- [32] Ali A, Bennett J M, Biggs A A J, Marchuk A, Ghahramani A. Assessing the hydraulic reduction performance of HYDRUS-1D for application of alkaline irrigation in variably-saturated soils: Validation of pH driven hydraulic reduction scaling factors[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107101
- [33] Wang R, Yang X, Chi Y, Zhang X, Ma X, Zhang D, Zhao T, Ren Y, Yang H, Ding W, Chu S, Zhou P. Regulation of hydrogen rich water on strawberry seedlings and root endophytic bacteria under salt stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1497362
- [34] Duan S L, Feng G, Limpens E, Bonfante P, Xie X A, Zhang L. Cross-kingdom nutrient exchange in the plant-arbuscular mycorrhizal fungus-bacterium continuum[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22: 773-790
- [35] Pasković I, Soldo B, Goreta Ban S, Radić T, Lukić M, Urlić B, Mimica M, Brkić Bubola K, Colla G, Roupheal Y, Major N, Šimpraga M, Ban D A, Palčić I, Franić M, Grozić K, Lukić I. Fruit quality and volatile compound composition of processing tomato as affected by fertilisation practices and arbuscular mycorrhizal fungi application[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129961
- [36] Hou L J, Whalen J K, Constant P. Ecological traits of high-affinity hydrogen-oxidizing soil bacteria involved in the hydrogen cycle[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 207: 109831
- [37] Xie X F, Turatsinze A N, Liu Y, Chen G F, Yue L, Ye A L, Zhou Q, Zhang Z Y, Wang Y, Zhang Y B, Jin W J, Li Z P, Sessitsch A, Brader G, Wang R Y. Bioinoculant substitution enhances rhizosphere soil quality and maize growth by modulating microbial communities and host gene expression in alkaline soils[J]. *Microbiological Research*, 2025, 297: 128194
- [38] 潘妮, 程雪, 沈文彪, 陆巍. 富氢气对草莓生长发育及光合作用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(2): 278-286
- Pan N, Cheng X, Shen W B, Lu W. Effects of hydrogen-rich water on growth and photosynthesis of strawberry [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(2): 278-286 (in Chinese)
- [39] Jing T, Li J Y, He Y D, Shankar A, Saxena A, Tiwari A, Maturi K C, Solanki M K, Singh V, Eissa M A, Ding Z L, Xie J H, Awasthi M K. Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions: A comprehensive review[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 210: 108602
- [40] 王子凡, 张庆银, 李燕, 王丹丹, 耿晓彬, 贾红卫, 齐连芬, 师建华, 赵丽霞, 田东良. 不同钙肥对口感型番茄品质及脐腐病的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(10): 65-70
- Wang Z F, Zhang Q Y, Li Y, Wang D D, Geng X B, Jia H W, Qi L F, Shi J H, Zhao L X, Tian D L. Effect of different calcium fertilizers on quality and umbilical rot of palatable tomatoes[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(10): 65-70 (in Chinese)
- [41] Morales J, Martínez-Alcántara B, Bermejo A, Millos J, Legaz F, Quiñones A. Effect of calcium fertilization on calcium uptake and its partitioning in *Citrus trees*[J]. *Agronomy*, 2023, 13(12): 2971
- [42] Liu N, Zhang L, Meng X X, Ara N, Yang J H, Zhang M F. Effect of nitrate/ammonium ratios on growth, root morphology and nutrient elements uptake of watermelon (*Citrullus lanatus*) seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(11): 1859-1872

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 韩传坤, 硕士研究生。2024年9月至今就读于中国农业大学园艺学院农艺与种业专业, 研究方向为设施蔬菜高效栽培。参与项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2300703)、国家大学生URP创新性实验计划项目(X2024100190740)。



通讯作者简介: 张文娜, 中国农业大学园艺学院副教授, 博士生导师。主要从事设施蔬菜高效栽培与逆境生理、园艺作物嫁接及砧穗互作、植物体内RNA和蛋白质大分子运输机理研究。以通讯作者、第一作者在 *Plant Cell*、*Nature Plants*、*New Phytologist*、*Plant Physiology*、*Horticulture Research*、*The Plant Journal* 等期刊发表SCI论文30余篇, 授权国家发明专利5项。主持国家自然科学基金面上项目2项、国家重点研发计划子课题4项。现任 *Vegetable Research*、*Horticulture Research*、《园艺学报》期刊青年编委等学术职务。