

### 3 种微生物菌剂肥对不同生育时期西瓜生长、果实品质及矿质元素吸收的影响

李务焜, 李昊熙, 李 乐

(杨凌职业技术学院生物工程学院 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 以美都西瓜为材料, 设置 4 个处理, 以清水为对照(CK), 研究单施丛枝菌根真菌菌剂肥(AMF)、单施芽孢杆菌菌剂肥(BAC)、丛枝菌根真菌菌剂肥与芽孢杆菌菌剂肥联合施用(MIX) 3 种微生物菌剂肥对西瓜生长、果实品质、产量及矿质元素吸收的影响。结果表明, 在苗期联合施用菌剂肥, 与 CK 相比, 第 35 天显著提高了西瓜的蔓长、茎粗、叶面积和叶绿素含量(SPAD 值), 分别提高了 23.33%、12.58%、49.88% 和 23.70%; 联合施用菌剂肥的西瓜在单瓜质量、果肉中心维生素 C 和可溶性固形物含量(w, 后同)方面表现最佳, 分别为 7.37 kg、13.87 mg·100 g<sup>-1</sup> 和 14.72%。此外, 苗期联合使用菌剂肥西瓜果肉的 N、P、K 含量均最高, 分别为 12.57 g·kg<sup>-1</sup>、1.79 g·kg<sup>-1</sup>、14.83 g·kg<sup>-1</sup>, 且苗期施用菌剂肥对西瓜单瓜质量、果实品质的提升效果优于花期施用相应菌剂肥。综合分析表明, 使用微生物菌剂肥对西瓜植株生长、矿质元素吸收及果实品质均有促进作用, 联合施用菌剂肥效果最佳且苗期施用效果好于花期。

**关键词:** 西瓜; 微生物菌剂肥; 生长发育; 果实品质; 矿质元素吸收

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-109-06

### Effects of three microbial fertilizers on growth, fruit quality and nutrient uptake of watermelon at different fertility periods

LI Wukun, LI Haoxi, LI Le

(College of Bioengineering, Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Using Meidu watermelon as experimental material, four treatments were established with clear water as the control (CK). The study investigated the effects of three microbial fertilizers [Arbuscular mycorrhizal fungi inoculant (AMF), Bacillus inoculant (BAC), and combined AMF and BAC application (MIX)] on watermelon growth, fruit quality, yield, and mineral element absorption. The results demonstrated that the mixed inoculant (MIX) at the seedling stage significantly enhanced vine length, stem diameter, leaf area, and chlorophyll content (SPAD value) at 35 days post-treatment compared to CK, with increases of 23.33%, 12.58%, 49.88% and 23.70%, respectively. The MIX treatment also exhibited optimal performance in single fruit mass (7.37 kg), vitamin C content (13.87 mg·100 g<sup>-1</sup>) and soluble solids content (14.72%) in the center of watermelon flesh. Furthermore, application mixed inoculant at the seedling stage showed the highest N, P, and K contents in watermelon flesh, which were 12.57, 1.79, and 14.83 g·kg<sup>-1</sup>, respectively and the application of microbial fertilizer at the seedling stage has a better effect on improving the single fruit weight and fruit quality of watermelon than that at the flowering stage. Comprehensive analysis revealed significant correlations between microbial fertilizers application and improvement in plant growth, mineral element uptake, and fruit quality, the combined inoculant achieving the most pronounced effects and the application effect at the seedling stage is better than that at the flowering stage.

**Key words:** Watermelon; Microbial fertiliser; Growth and development; Fruit quality; Mineral element uptake

西瓜(*Citrullus lanatus* L.)是一种重要的经济作物, 其显著的经济效益深受农户和市场的广泛青睐。近年来, 陕西省西瓜种植面积逐年扩大, 但西瓜的单产水平较低, 且病害问题尤为突出, 影响西

瓜的品质与产量<sup>[1]</sup>。目前, 西瓜生产仍依赖大量使用化肥, 这不仅降低了肥料的利用率, 导致水肥资源过度消耗, 也可能会引起土壤板结、肥力减退以及地下水污染等环境问题<sup>[2]</sup>。科学选用生物菌肥是

收稿日期: 2024-10-02; 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 杨凌职业技术学院 2024 年校内基金项目(ZK24-40)

作者简介: 李务焜, 男, 助教, 主要从事农业土壤与肥料研究。E-mail: 17745161075@163.com

农业可持续发展的重要抓手。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)和芽孢杆菌(*Bacillus* spp., BAC)作为两种菌剂肥料的重要成分,不仅可以促进植物生长,增强植物的抗病性和耐逆性,还能在优化土壤理化特性的同时,增强土壤微生物群落的丰富度<sup>[3]</sup>。丛枝菌根真菌通过与植物根系形成共生关系,促进植物对土壤养分和水分的吸收;芽孢杆菌则通过产生抗生素、竞争性地排斥病原菌、促进植物分泌生长素等多种机制,提高植物的健康程度和生长速度<sup>[4-5]</sup>。

有研究表明,单独应用丛枝菌根真菌或芽孢杆菌均能显著改善作物的生长状况和土壤环境。张淑彬等<sup>[6]</sup>研究表明,丛枝菌根真菌能有效提高玉米对磷的吸收效率;王潇敏等<sup>[7]</sup>研究表明,芽孢杆菌处理能显著提高番茄的产量和品质。近年来,研究者开始将丛枝菌根真菌与芽孢杆菌联合施用,从而促进作物生长,并提高品质。然而,关于丛枝菌根真菌与芽孢杆菌联合施用于西瓜的研究相对较少,尤其是在不同生长阶段对西瓜的综合效应方面,仍缺乏系统的研究。

本研究旨在探讨在不同生长阶段,丛枝菌根真菌与芽孢杆菌联合应用对西瓜生长和品质的综合效应。通过田间试验,评估施用不同菌剂肥对西瓜植株生长指标、果实产量和品质、果实对矿质元素吸收的影响。研究结果将揭示丛枝菌根真菌与芽孢杆菌联合应用的潜在机制,为生物肥料的合理应用提供科学依据。通过优化不同生长阶段的菌剂肥施用策略,为西瓜的高效生产提供新的技术支持,推动西瓜产业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以美都西瓜(由杭州浙蜜园艺研究所、宁波市种子选育)为试验材料,待长出5片真叶后于2024年4月30日定植。

供试丛枝菌根真菌菌剂肥由挪威芭欧德科技有限公司提供,根内根孢囊霉 $\geq 70$ 个 $\cdot g^{-1}$ 。

供试枯草芽孢杆菌菌剂肥由天津开发区坤禾生物技术有限公司提供,为高活性枯草芽孢杆菌液体制剂,芽孢数 $\geq 6.0 \times 10^{10}$  CFU $\cdot g^{-1}$ 。

### 1.2 试验地概况

试验基地位于陕西省宝鸡市陈仓区周原镇西刘村,地处渭河平原,前茬作物为小麦。本试验采用随机区组设计,共有6个8 m $\times$ 30 m的大棚,每

个大棚定植两垄瓜苗,垄间距为1.5 m,株间距为15 cm,每棚共计400株。

### 1.3 方法

1.3.1 试验设计方法 试验共有6个大棚,其中3个大棚苗期(苗龄35 d)施用菌剂肥,另外3个大棚花期(50%植株开花)施用菌剂肥,每个大棚内设置4个处理,分别为单施清水(CK)、单施丛枝菌根真菌菌剂肥(AMF)、单施芽孢杆菌菌剂肥(BAC)、丛枝菌根真菌菌剂肥与芽孢杆菌菌剂肥联合施用(MIX)。每个处理定植100株西瓜,不同处理土壤之间埋入1 m深的木板以防止肥料互相渗透,确保试验的独立性和结果的可靠性。

1.3.2 施肥方案 底肥:在西瓜移栽前1周施入,以有机肥与油渣为主,施用量为30 t $\cdot hm^{-2}$ 。菌剂肥施用为丛枝菌根真菌菌剂肥,施用量15 kg $\cdot hm^{-2}$ ;芽孢杆菌菌剂肥施用量10 kg $\cdot hm^{-2}$ ;联合施用处理组同时施用上述2种菌剂肥,施用量7.5 kg $\cdot hm^{-2}$ 丛枝菌根真菌菌剂肥+5 kg $\cdot hm^{-2}$ 芽孢杆菌菌剂肥,对照组施用等体积的清水。其中3个棚在西瓜苗期将肥料溶于水以液肥形态施于根际,另外3个棚在西瓜花期以相同方式施入。

1.3.3 测定方法 施肥后35 d用卷尺测量蔓长及叶片长、宽,并计算叶面积大小(叶面积=叶片长 $\times$ 叶片宽 $\times$ 叶面积系数),其中叶面积系数为0.7;使用游标卡尺测量茎粗;使用叶绿素测定仪TYS-B(托普云农)测量叶绿素含量(SPAD值)。

果实成熟后,使用电子秤称量果实质量;使用游标卡尺测定果实纵横径,并计算果形指数(果实纵横径的比值)。使用折光仪测定果肉中心及边部可溶性固形物含量;使用2,6-二氯酚法测定果肉维生素C含量<sup>[8]</sup>;使用酸碱滴定法测定果肉可滴定酸含量<sup>[9]</sup>;分别使用凯氏定氮法<sup>[10]</sup>、钼蓝比色法<sup>[11]</sup>以及火焰光度计法<sup>[12]</sup>测定果肉N、P、K含量。每个处理取5个样本进行3次重复后取均值。

1.3.4 数据处理 所有测定指标的数值均为3次重复试验的平均值。采用R 4.4.1软件中的Agricolae包对试验数据进行统计分析。采用方差分析(ANOVA)和多重比较(Tukey's Test)进行差异显著性分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 苗期不同菌剂肥处理对西瓜植株生长指标及SPAD值的影响

在西瓜苗期施用3种菌剂肥35 d后,西瓜的生

长指标及 SPAD 值如表 1 所示。除 BAC 处理的西瓜茎粗与 CK 相比无显著差异外,其他菌剂肥处理西瓜植株的生长指标及 SPAD 值均显著高于 CK,且不同菌剂肥处理间差异显著。MIX 处理的蔓长、茎粗、叶面积、SPAD 值较 CK 分别显著增加了 23.33%、12.58%、49.88%、23.70%,AMF 处理的蔓长、茎粗、叶面积、SPAD 值较 CK 分别显著增加了 19.53%、5.02%、30.38%、16.42%。

表 1 苗期不同菌剂肥处理对西瓜生长指标及 SPAD 值的影响

Table 1 Effects of different microbial fertilisers treatments at the seedling stage on growth indexes and SPAD value of watermelon

| 处理         | 蔓长             | 茎粗                 | 叶面积                       | SPAD 值       |
|------------|----------------|--------------------|---------------------------|--------------|
| Treat-ment | Vine length/cm | Stem thick-ness/mm | Leaf area/cm <sup>2</sup> | SPAD value   |
| CK         | 367.87±9.04 d  | 6.05±0.18 c        | 521.43±36.60 d            | 51.57±1.00 d |
| BAC        | 414.40±9.23 c  | 5.98±0.15 c        | 584.37±42.63 c            | 54.85±1.25 c |
| AMF        | 439.67±7.16 b  | 6.35±0.27 b        | 679.83±36.24 b            | 60.04±1.28 b |
| MIX        | 453.53±8.31 a  | 6.81±0.19 a        | 785.67±56.37 a            | 63.80±1.46 a |

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 苗期不同菌剂肥处理对西瓜果实性状的影响

2.2.1 苗期不同菌剂肥处理对西瓜单瓜质量以及果实形态指标的影响 由表 2 可知,与 CK 相比,3 种不同菌剂肥处理单瓜质量均显著高于 CK,其中 MIX 处理单瓜质量最高,达 7.37 kg,较 CK 显著提高了 43.39%,同时其纵径和横径也较 CK 分别显著提高了 18.33%和 19.46%,表现出了最强的促进效果,这表明了 MIX 处理对西瓜生长发育有积极作用。AMF 处理在单瓜质量的表现上也较为良好,达 7.00 kg,较 CK 显著增加了 36.19%,其纵径和横径较 CK 也分别显著增加了 14.98%和 14.64%。BAC 处理虽然较 CK 在单瓜质量上的提高幅度(19.46%)小于 AMF 和 MIX 处理,但仍显著高于 CK,与 CK

表 2 苗期不同菌剂肥处理对西瓜单瓜质量以及果实形态指标的影响

Table 2 Effects of different microbial fertiliser treatments at seedling stage on single fruit mass and fruit morphological indicators of watermelon

| 处理        | 单瓜质量                 | 纵径                       | 横径                     | 果形指数              |
|-----------|----------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
| Treatment | Single fruit mass/kg | Longitudinal diameter/cm | Transverse diameter/cm | Fruit shape index |
| CK        | 5.14±0.26 c          | 21.50±0.25 c             | 19.94±0.44 b           | 1.04±0.02 a       |
| BAC       | 6.14±0.46 b          | 22.60±1.47 b             | 19.64±0.55 b           | 1.06±0.04 a       |
| AMF       | 7.00±0.25 a          | 24.72±0.89 a             | 22.86±0.85 a           | 1.08±0.06 a       |
| MIX       | 7.37±0.38 a          | 25.44±0.54 a             | 23.82±1.12 a           | 1.07±0.05 a       |

相比,BAC 处理的纵径提高了 5.12%,横径降低了 1.50%,尽管横径略低于 CK,但差异不显著。

与 CK 相比,除 BAC 处理横径外,其余菌剂肥处理均显著提高了西瓜的单瓜质量、纵径和横径。此外,不同处理间果形指数差异不显著。

2.2.2 苗期不同菌剂肥处理对西瓜果实品质的影响 由表 3 可知,苗期不同菌剂肥处理的西瓜果肉维生素 C、可溶性固形物含量均高于 CK。MIX 处理的果肉中心维生素 C 含量最高,为 13.87 mg·100 g<sup>-1</sup>,显著高于 CK,其果肉边部维生素 C 含量也最高,达 10.98 mg·100 g<sup>-1</sup>,且中边差(中心与边部的差值)较小,表明 MIX 处理能够促进维生素 C 在果肉中均匀分布。BAC 和 AMF 处理的果肉中心维生素 C 含量较 CK 显著提高,但仍低于 MIX 处理。MIX 处理果肉中心可溶性固形物含量为 14.72%,显著高于其他处理,且边部含量(13.07%)也最高,这表明 MIX 处理能够显著提高西瓜的整体甜度。虽然 AMF 和 BAC 处理果肉的可溶性固形物含量较 CK 也有提高,但提高幅度不及 MIX 处理。果肉可滴定酸含量方面,所有菌剂肥处理均低于 CK,但 BAC 处理的降幅最大,可滴定酸含量降至 0.16 g·kg<sup>-1</sup>,表明 BAC 处理可能对果肉酸度有一定影响。

2.2.3 苗期不同菌剂肥处理对西瓜果肉矿质元素含量的影响 由表 4 中可知,MIX 处理西瓜果肉中

表 3 苗期不同菌剂肥处理对西瓜果实品质的影响

Table 3 Effects of different microbial fertiliser treatments at seedling stage on watermelon fruit quality

| 处理        | w(维生素 C)                                    |              |                        | w(可溶性固形物)                |               |                        | w(中心可滴定酸)                                                    |
|-----------|---------------------------------------------|--------------|------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|
|           | Vitamin C content/(mg·100 g <sup>-1</sup> ) |              |                        | Soluble solids content/% |               |                        |                                                              |
| Treatment | 中心                                          | 边部           | 中边差                    | 中心                       | 边部            | 中边差                    | Titrateable acid content in the center/(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|           | Center                                      | Edge         | Center-edge difference | Center                   | Edge          | Center-edge difference |                                                              |
| CK        | 7.69±0.33 c                                 | 7.42±0.54 b  | 0.27                   | 11.93±0.21 d             | 11.00±0.20 c  | 0.93                   | 0.23±0.01 a                                                  |
| BAC       | 11.64±0.91 b                                | 8.49±0.54 b  | 3.15                   | 13.12±0.10 c             | 11.45±0.18 bc | 1.67                   | 0.16±0.02 b                                                  |
| AMF       | 12.84±0.20 ab                               | 8.71±0.66 b  | 4.13                   | 13.55±0.15 b             | 12.05±0.23 b  | 1.50                   | 0.19±0.02 b                                                  |
| MIX       | 13.87±0.61 a                                | 10.98±0.34 a | 2.89                   | 14.72±0.10 a             | 13.07±0.38 a  | 1.65                   | 0.17±0.01 b                                                  |

N 含量最高,为 12.57 g·kg<sup>-1</sup>,显著高于 CK;AMF 和 BAC 处理虽显著高于 CK,但仍低于 MIX 处理。MIX 处理果肉中 P 含量最高,为 1.79 g·kg<sup>-1</sup>,显著高于 CK,AMF 处理果肉中 P 含量也显著高于 CK、BAC 处理。MIX 处理果肉 K 含量为 14.83 g·kg<sup>-1</sup>,显著高于其他处理。AMF 处理果肉中 K 含量也达到了 13.75 g·kg<sup>-1</sup>,显著高于 CK 和 BAC 处理。MIX 处理在提高西瓜果肉 N、P、K 3 种矿质元素含量方面表现最为突出。与 CK 相比,BAC、AMF 处理虽然也表现出较好的效果,但在果实矿质元素全面提升上不如 MIX 处理,总体趋势为 MIX>AMF>BAC>CK。

表 4 苗期不同菌剂肥处理对西瓜果肉矿质元素含量的影响  
Table 4 Effects of different microbial fertiliser treatments at seedling stage on mineral element content of watermelon flesh (g·kg<sup>-1</sup>)

| 处理<br>Treatment | w(N)<br>Nitrogen<br>content | w(P)<br>Phosphorus<br>content | w(K)<br>Potassium<br>content |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| CK              | 8.70±0.13 c                 | 0.95±0.03 b                   | 9.36±0.05 d                  |
| BAC             | 11.80±0.25 b                | 1.05±0.03 b                   | 12.97±0.10 c                 |
| AMF             | 12.39±0.18 a                | 1.72±0.04 a                   | 13.75±0.36 b                 |
| MIX             | 12.57±0.15 a                | 1.79±0.08 a                   | 14.83±0.28 a                 |

2.3 花期不同菌剂肥处理对西瓜植株生长指标及 SPAD 值的影响

在西瓜花期施用 3 种菌剂肥 35 d 后,西瓜的生长指标及 SPAD 值如表 5 所示。MIX 处理在促进蔓长伸长、增加茎粗、扩大叶面积以及提高 SPAD 值方面均优于其他处理,显著高于 CK,其蔓长、茎粗、叶面积、SPAD 值较 CK 分别显著增加了 17.7%、9.3%、40.7%与 35.3%。与 CK 相比,AMF 处理植株的蔓长、叶面积、SPAD 值显著增加,分别增加了 10.1%、24.6%、30.4%。BAC 处理植株的蔓长、SPAD 值也显著高于 CK。因此,花期施用不同菌剂肥对西瓜的蔓长、叶面积和 SPAD 值均有

表 5 花期不同菌剂肥处理对西瓜生长指标及 SPAD 值的影响

Table 5 Effects of different microbial fertilisers treatments at flowering stage on growth indexes and SPAD value of watermelon

| 处理<br>Treat-<br>ment | 蔓长<br>Vine length/<br>cm | 茎粗<br>Stem thick-<br>ness/mm | 叶面积<br>Leaf area/<br>cm <sup>2</sup> | SPAD 值<br>SPAD value |
|----------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| CK                   | 452.33±5.25 d            | 6.01±0.25 b                  | 427.97±40.18 c                       | 41.90±1.67 d         |
| BAC                  | 472.40±7.20 c            | 5.95±0.20 b                  | 449.00±49.22 c                       | 47.38±1.53 c         |
| AMF                  | 498.20±7.21 b            | 6.00±0.24 b                  | 533.20±40.20 b                       | 54.63±1.44 b         |
| MIX                  | 532.07±9.51 a            | 6.44±0.31 a                  | 601.77±45.33 a                       | 56.71±1.15 a         |

促进作用,其中对蔓长、SPAD 值均有显著促进作用。

2.4 花期不同菌剂肥处理对西瓜果实性状的影响

2.4.1 花期不同菌剂肥处理对西瓜单瓜质量以及果实形态指标的影响 由表 6 可知,与 CK 相比,不同的菌剂肥处理对西瓜单瓜质量影响显著。AMF 处理西瓜的单瓜质量、纵径和横径显著高于 CK,较 CK 分别显著提高了 35.12%、11.14%和 11.11%;MIX 处理也具有较好的效果,其单瓜质量显著高于 CK,较 CK 显著提高了 28.84%,纵径提高了 8.23%,横径显著提高了 10.05%,虽然略低于 AMF 处理,但改善效果依然突出;BAC 处理在增加单瓜质量、纵径和横径方面也有一定效果,分别提高了 19.07%、4.92%和 3.92%,尽管提高幅度小于 AMF 和 MIX 处理,但仍然表现出了良好的肥效。就果形指数而言,不同的菌剂肥处理西瓜果实的果形指数与 CK 均无显著差异。此外,苗期联合施用菌剂肥单瓜质量最大,花期单施从枝菌根真菌菌剂肥单瓜质量最大,且苗期施用不同菌剂肥西瓜单瓜质量、纵径、横径均高于花期施用相应菌剂肥。

表 6 花期不同菌剂肥处理对西瓜单瓜质量以及果实形态指标的影响

Table 6 Effects of different microbial fertiliser treatments at flowering stage on watermelon single melon mass as well as fruit morphological indexes

| 处理<br>Treatment | 单瓜质量<br>Single fruit<br>mass/kg | 纵径<br>Longitudinal<br>diameter/cm | 横径<br>Transverse<br>diameter/cm | 果形指数<br>Fruit shape<br>index |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| CK              | 4.30±0.30 c                     | 19.92±0.52 b                      | 18.90±0.51 b                    | 1.05±0.04 a                  |
| BAC             | 5.12±0.22 b                     | 20.90±0.40 b                      | 19.64±0.55 b                    | 1.06±0.03 a                  |
| AMF             | 5.81±0.20 a                     | 22.14±0.35 a                      | 21.00±0.65 a                    | 1.05±0.02 a                  |
| MIX             | 5.54±0.19 ab                    | 21.56±0.23 ab                     | 20.80±0.25 a                    | 1.03±0.02 a                  |

2.4.2 花期不同菌剂肥处理对西瓜果实品质的影响 由表 7 可知,与 CK 相比,MIX 处理可显著提高西瓜果肉的维生素 C、可溶性固形物和可滴定酸含量。与 CK 相比,MIX 处理果肉中心维生素 C 含量显著提高了 76.81%,边部维生素 C 含量显著提高了 86.9%;与 CK 相比,BAC 和 AMF 处理的果肉中心和边部维生素 C 含量也有所提高,中心维生素 C 含量分别提高了 43.15%和 28.02%,边部维生素 C 含量分别提高了 62.14%和 44.17%。在可溶性固形物含量方面,MIX 处理同样表现出了最优的提高效果,相较于 CK,果肉中心及边部可溶性固形物含量分别显著提高了 14.65%和 18.02%;AMF、BAC 处理果肉中心可溶性固形物含量较 CK 分别提高了 4.12%、3.01%,边部可溶性固形物含量分别提高了

9.88%、4.12%。在可滴定酸含量方面,MIX 处理显著高于 CK 且增幅最大,达到 55.56%,而 BAC 处理相较 CK 提高了 11.11%,AMF 处理的可滴定酸含量较 CK 略有下降,为-11.11%,这可能对果肉的整体风味产生影响。值得注意的是,在苗期施用 3 种菌剂肥的果实品质指标,均高于花期施用相应菌剂肥。

表 7 花期不同菌剂肥处理对西瓜果实品质的影响

Table 7 Effects of different microbial fertiliser treatments at flowering stage on watermelon fruit quality

| 处理<br>Treatment | w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·100 g <sup>-1</sup> ) |             |                                  | w(可溶性固形物)Soluble solids content/% |              |                               | w(中心可滴定酸)<br>Center titratable acid<br>content/(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                 | 中心<br>Center                                         | 边部<br>Edge  | 中边差<br>Center-edge<br>difference | 中心<br>Center                      | 边部<br>Edge   | 中边差<br>Center-edge difference |                                                                      |
| CK              | 4.96±0.95 c                                          | 4.12±0.21 c | 0.84                             | 12.63±0.08 c                      | 10.93±0.20 c | 1.70                          | 0.09±0.01 b                                                          |
| BAC             | 7.10±0.74 ab                                         | 6.68±0.42 b | 0.42                             | 13.01±0.08 bc                     | 11.38±0.18 c | 1.63                          | 0.10±0.02 b                                                          |
| AMF             | 6.35±0.56 bc                                         | 5.94±0.42 b | 0.41                             | 13.15±0.07 b                      | 12.01±0.18 b | 1.14                          | 0.08±0.01 b                                                          |
| MIX             | 8.77±0.61 a                                          | 7.70±0.21 a | 1.07                             | 14.48±0.22 a                      | 12.90±0.24 a | 1.58                          | 0.14±0.01 a                                                          |

2.4.3 花期不同菌剂肥处理对西瓜果肉矿质元素含量的影响 由表 8 可知,3 种不同菌剂肥处理果肉的 N 含量差异显著,但均显著高于 CK,其中 MIX 处理最高,较 CK 显著提高了 42.82%。3 种不同菌剂肥处理西瓜果肉的 P 含量均显著高于 CK,其中 MIX 处理含量最高,为 1.40 g·kg<sup>-1</sup>。在果肉 K 含量方面,MIX 处理含量最高,为 9.56 g·kg<sup>-1</sup>,与 AMF 处理无显著差异,但均显著高于 CK。综合考虑 N、P、K 3 种矿质元素含量,MIX 处理表现最为突出,总体趋势为 MIX>AMF>BAC>CK。此外,苗期施用 3 种菌剂肥,西瓜果肉中 N、K 含量均高于花期施用相应菌剂肥。

表 8 花期不同菌剂肥处理对西瓜果肉矿质元素的影响

Table 8 Effects of different microbial fertiliser treatments at flowering stage on mineral element content of watermelon flesh

| 处理<br>Treatment | w(矿质元素)Mineral element content/(g·kg <sup>-1</sup> ) |                            |                           |
|-----------------|------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                 | w(N)<br>Nitrogen content                             | w(P)<br>Phosphorus content | w(K)<br>Potassium content |
| CK              | 7.31±0.10 d                                          | 1.03±0.02 c                | 8.47±0.17 b               |
| BAC             | 8.91±0.08 c                                          | 1.16±0.03 b                | 8.75±0.27 b               |
| AMF             | 9.49±0.25 b                                          | 1.16±0.04 b                | 9.37±0.09 a               |
| MIX             | 10.44±0.27 a                                         | 1.40±0.05 a                | 9.56±0.05 a               |

3 讨论与结论

苗期和花期是西瓜两个关键的生长阶段,其生长水平是决定西瓜产量和品质的关键因素,影响直接且显著<sup>[13-14]</sup>。由本试验结果可知,在苗期施用微生物菌剂肥西瓜的单瓜质量,果实纵横径,西瓜品质指标以及对 N、K 的吸收能力均高于在花期施用相应菌剂肥。枯草芽孢杆菌是一种重要的微生物菌剂肥成分,可以显著提高西瓜生长水平、品质以

及产量,其原因是枯草芽孢杆菌可以优化土壤,进一步刺激了植物的生理代谢过程<sup>[15-16]</sup>,形成了一种良性的植物-土壤-微生物生态系统,从而在更大程度上提高了果实品质<sup>[17]</sup>。

此外,丛枝菌根真菌也广泛应用于农业生产中,能够有效改善作物的生长水平,提高产量和品质,同时还能提高作物的养分吸收能力<sup>[18]</sup>。周世品<sup>[19]</sup>表明,接种了丛枝菌根真菌的西瓜植株的地上、地下部分生物量以及总的干物质量都显著增加,分别提高了 56.1%、45.6%以及 55.9%,其产量也提高了 48.0%。此外,接种丛枝菌根真菌还可显著提高果肉边部的可溶性糖和维生素 C 含量。肖靓<sup>[20]</sup>的研究表明,接种丛枝菌根真菌后,西瓜植株的 N、P、K 含量相较于施用清水的对照显著提高。本研究表明,施用丛枝菌根真菌菌剂肥可以有效地促进西瓜植株的生长,提高西瓜果实产量、品质,且对西瓜植株生长的积极影响要大于芽孢杆菌菌剂肥。可能是施用丛枝菌根真菌菌剂肥的西瓜植株根系会形成巨大的菌丝网络,从而显著提高西瓜对矿质元素的吸收能力,并且西瓜叶片叶绿体的超微结构会更健康,从而提高光合速率,促进植株生长<sup>[21]</sup>。

研究表明,相较于单独接种任何一种微生物菌剂,联合接种丛枝菌根真菌和芽孢杆菌在植物生长方面表现出了协同效应<sup>[21]</sup>。Vafadar 等<sup>[22]</sup>对甜叶菊联合接种了丛枝菌根真菌以及芽孢杆菌,结果表明两种菌之间展现出了极高的协同效应,所有联合接种丛枝菌根真菌与芽孢杆菌植物的各项生长参数(包括甜菊苷含量)都有显著提高。Thilagar 等<sup>[23]</sup>通过研究联合接种丛枝菌根真菌与芽孢杆菌的肥料用量可知,联合接种可以将辣椒 N、P、K 肥料用量

降至原来的 50%,且未对辣椒的生长情况、营养价值和产量造成负面影响。本研究中,微生物菌剂肥联合施用对西瓜的生长、产量、品质以及矿质元素吸收的影响,与前人研究一致。联合施用丛枝菌根真菌菌剂肥与芽孢杆菌菌剂肥的西瓜植株的生长指标(蔓长、茎粗、叶面积、SPAD 值)、产量指标(单瓜质量、果实纵横径)、品质指标(可溶性固形物、维生素 C 含量)及果肉矿质元素的含量均高于单一施用丛枝菌根真菌菌剂肥或芽孢杆菌菌剂肥,其整体趋势为 MIX>AMF>BAC>CK。这可能因为将微生物引入土壤可以改善植物整体健康状况,并最大程度地激发其生理功能,保护植物免受病原体的侵害<sup>[24]</sup>。联合施用效果最优可能是因为丛枝菌根真菌与芽孢杆菌产生了协同效应,不仅会刺激西瓜的生长和对养分的吸收,还调节了其渗透调节系统和抗氧化酶系统<sup>[25]</sup>。此外,苗期施用菌剂肥西瓜的单瓜质量、维生素 C 和可溶性固形物含量及果肉 N、K 元素含量均高于花期施用相应菌剂肥,且与相应对照相比,提升效果更好,这可能是因为苗期是西瓜根系和叶片生长发育的关键阶段,此时施用菌剂对茎粗、叶面积的促进效果优于花期施用相应菌剂肥,进而促进西瓜植株生长及果实发育,而花期处理错过最佳互作窗口期,但是具体机制有待进一步研究。

综上所述,3 种不同的微生物菌剂肥处理均会不同程度地对西瓜植株的生长、产量、品质以及矿质元素吸收产生积极作用。其中,联合施用效果最为明显,积极影响趋势为 MIX>AMF>BAC>CK,且苗期施用菌剂肥效果好于花期。然而,目前的研究主要集中在 3 种微生物菌剂肥在两个关键生育阶段对西瓜的影响上,而如何确定丛枝菌根真菌菌剂肥与芽孢杆菌菌剂肥联用的最佳施用比例,以及微生物菌剂肥在不同生育阶段施用对西瓜生长发育影响的具体作用机制,仍有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 金辉,侯东颖,张曼,等.水肥耦合对大棚西瓜产量、品质及养分吸收的影响[J].中国土壤肥料,2021(2):141-148.
- [2] 张光伟,焦自高,史庆华,等.西瓜果实膨大期追施氮钾肥对土壤及果实品质的影响[J].山东农业科学,2017,49(1):87-90.
- [3] 陈小翔,杨承,贺帅,等.不同施肥方式对土壤理化性质和烟草生长的影响[J].山地农业生物学报,2024,43(5):26-31.
- [4] CARTMILL D L, ALARCÓN A, VOLDER A, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate growth of *Ulmus parvifolia* Jacq. at suboptimal planting depths[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144, 74-80.
- [5] MILJAKOVIĆ D, MARINKOVIĆ J, BALEŠEVIĆ-TUBIĆ S. The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops[J]. Microorganisms, 2020, 8(7):1037.
- [6] 张淑彬,王幼珊,殷晓芳,等.不同施磷水平下 AM 真菌发育及其对玉米氮磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2017, 23(3):649-657.
- [7] 王满敏,李恋卿,潘根兴,等.胶冻芽孢杆菌与生物炭复配及对番茄产量和品质的影响[J].土壤,2016,48(3):479-485.
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定:GB 5009.86—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.食品中总酸的测定:GB/T 12456—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [10] 聂晶晶,杨翠,陈文昶,等.凯氏定氮仪测定土壤全氮方法优化[J].环境保护前沿,2024,14(1):24-31.
- [11] 王维.硫酸钼蓝直接比色法测定铜合金中磷[J].分析试验室, 1985(4):63.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 贾文鹤,王喜庆,闫闻,等.不同生长调节物质对西瓜幼苗生长发育的影响[J].中国瓜菜,2020,33(8):16-20.
- [14] 祝永键,孙志德,李火金,等.开花期追施氯化钾对西瓜的影响[J].中国瓜菜,2007,20(1):24-25.
- [15] 陈甦,段海明,李帅,等.3 株芽孢杆菌及其混合发酵液对西瓜幼苗生长的影响[J].中国瓜菜,2024,37(2):46-51.
- [16] 陈昆,马月霞,郭姣洁,等.枯草芽孢杆菌对饲用西瓜营养品质与产量的影响[J].中国饲料,2024(10):132-135.
- [17] 邵阳,崔孟奇,田霄鸿,等.枯草芽孢杆菌与解磷细菌对猕猴桃园土壤及果实品质的影响[J].干旱地区农业研究,2016, 34(5):180-184.
- [18] MICELI A, ROMANO C, MONCADA A, et al. Yield and quality of mini-watermelon as affected by grafting and mycorrhizal inoculum[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(2):505-516.
- [19] 周世品.有机无机肥配施和丛枝菌根化育苗对西瓜产量品质的影响[D].南京:南京农业大学,2017.
- [20] 肖靓.丛枝菌根育苗提高西瓜养分吸收和抗病能力的效应研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [21] YE L, ZHAO X, BAO E C, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on watermelon growth, elemental uptake, antioxidant, and photosystem II activities and stress-response gene expressions under salinity-alkalinity stresses[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10:863.
- [22] VAFADAR F, AMOOAGHAIE R, OTROSHY M. Effects of plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus on plant growth, stevioside, NPK, and chlorophyll content of *Stevia rebaudiana*[J]. Journal of Plant Interactions, 2014, 9(1):128-136.
- [23] THILAGAR G, BAGYARAJ D J, RAO M S. Selected microbial consortia developed for chilly reduces application of chemical fertilizers by 50% under field conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198:27-35.
- [24] BERENDSEN R, PIETERSE C, BAKKER P. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends Plant Science, 2012, 17(8):478-486.
- [25] NANJUNDAPPA A, BAGYARAJ D J, SAXENA A, et al. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants[J]. Fungal Biology and Biotechnology, 2019, 6(23):1-10.