

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.05.010

邢天琪, 刘希艳, 杜韵, 等. 不同灌溉措施对设施番茄农残及品质的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 111-119.

# 不同灌溉措施对设施番茄农残及品质的影响

邢天琪<sup>1</sup>, 刘希艳<sup>1</sup>, 杜韵<sup>2</sup>, 李琳<sup>1</sup>,  
吴晓燕<sup>3</sup>, 李元<sup>4</sup>, 王全红<sup>1</sup>

1. 北京市农产品质量安全中心, 北京 100032; 2. 北京中农绿安有机农业科技有限公司, 北京 100193;  
3. 张家港市农业试验站, 江苏 张家港 215600; 4. 陕西师范大学 西北国土资源研究中心, 西安 710119

**摘要:** 番茄是受到大众广泛喜爱的蔬菜, 然而在种植过程中常常面临水资源短缺和病虫害等问题. 采用田间试验, 滴灌、地下滴灌、微润灌溉、微喷灌、沟灌对番茄种植地耕层土壤水分分布的影响规律, 并对果实产量、品质及百菌清和高效氯氟菊酯残留量进行分析. 结果显示, 沟灌能够增加表层土壤[0~10) cm 的水分含量, 但对深层土壤[30~50) cm 的水分含量却会降低. 相比之下, 地下滴灌和微润灌溉能够增加深层土壤的水分含量, 使水分在土壤中的分布更加均匀. 微喷灌处理能够显著降低百菌清和高效氯氟菊酯的残留浓度, 在微喷灌处理下百菌清和高效氯氟菊酯的检出质量分数分别为 0.246 mg/kg 和 0.221 mg/kg. 与沟灌相比, 滴灌、地下滴灌、微润灌溉和微喷灌处理番茄的平均单果质量分别提高了 6.5%, 9.2%, 10.1% 和 8.3%; 总产量分别提高了 23.1%, 28.6%, 33.1% 和 22.7%. 品质分析发现, 地下滴灌能够显著提升果实中的维生素 C 含量, 而微润灌溉和微喷灌则能够显著提高果实中的番茄红素含量. 与沟灌相比, 地下滴灌和微润灌溉分别导致总固形物含量降低 9.0% 和 11.6%.

**关键词:** 灌溉措施; 番茄; 农残; 产量; 品质

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)05-0111-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Different Irrigation Measures on Pesticide Residues and Quality of Greenhouse Tomatoes

XING Tianqi<sup>1</sup>, LIU Xiyan<sup>1</sup>, DU Yun<sup>2</sup>, LI Lin<sup>1</sup>,  
WU Xiaoyan<sup>3</sup>, LI Yuan<sup>4</sup>, WANG Quanhong<sup>1</sup>

1. Beijing Agricultural Product Quality and Safety Center, Beijing 100032, China;  
2. Beijing Zhongnong Lv'an Organic Agriculture Technology Co. Ltd, Beijing 100193, China;  
3. Zhangjiagang Agricultural Experimental Station, Zhangjiagang Jiangsu 215600, China  
4. Northwest Land and Resources Research Center, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 陕西省社会科学基金专项项目(2023SJ03); 陕西省重点研发计划项目(2022NY-191).

作者简介: 邢天琪, 硕士, 农艺师, 主要从事农产品质量安全、园艺作物生产及植物保护研究.

通信作者: 王全红, 正高级农艺师.

**Abstract:** Tomato is a widely popular vegetable, but they often face challenges such as water scarcity and pest infestation during cultivation. In this study, a field experiment was conducted to investigate the effects of drip irrigation, subsurface drip irrigation, micro-sprinkler irrigation, micro-irrigation, and furrow irrigation on soil moisture distribution in the topsoil layer of tomato planting areas. Fruit yield, quality, and residual levels of chlorothalonil and cypermethrin were also analyzed. The results showed that in furrow irrigation, the moisture content increased in the surface soil layer [0–10) cm, but decreased in the deeper soil layer [30–50) cm. In contrast, subsurface drip irrigation and micro-irrigation increased the moisture content in the deeper soil layer, resulting in more uniform moisture distribution in the soil. Micro-sprinkler irrigation significantly reduced the residual concentrations of chlorothalonil and cypermethrin, which the monitored concentration of chlorothalonil and cypermethrin was 0.246 mg/kg and 0.221 mg/kg, respectively. Compared to furrow irrigation, drip irrigation, subsurface drip irrigation, micro-sprinkler irrigation, and micro-spray irrigation increased the average fruit weight of tomatoes by 6.5%, 9.2%, 10.1%, and 8.3%, respectively. The total production was also increased by 23.1%, 28.6%, 33.1%, and 22.7%, respectively. However, these irrigation methods did not significantly affect the number of fruits per plant. Quality analysis revealed that subsurface drip irrigation significantly increased the vitamin C content of tomatoes. Meanwhile, micro-irrigation and micro-sprinkler irrigation significantly increased the lycopene content of tomatoes. Compared to furrow irrigation, subsurface drip irrigation and micro-sprinkler irrigation resulted in a decrease of 9.0% and 11.6% in total solids content of fruit, respectively.

**Key words:** irrigation measures; tomato; agricultural residue; yield; quality

全球水资源日益紧张,随着人口增长和经济发展,农业用水的需求不断加大<sup>[1]</sup>.当前,传统灌溉方式存在诸多问题,超额灌溉现象普遍,不仅造成水资源浪费,还不利于蔬菜产量和品质的提高,且易引发土壤盐碱化现象.因此,迫切需要发展新型灌溉方式,提高水资源利用效率,实现可持续农业发展<sup>[2]</sup>.在这一背景下,研究不同灌溉措施对番茄产量、品质的影响具有重要的现实意义.

番茄是一种富含碳水化合物、多种维生素及有机酸的蔬菜,在日光温室中种植发展迅速<sup>[3]</sup>.番茄作为一种全球范围内广受欢迎的蔬菜品种,在营养丰富性和应用广泛性方面都占有重要地位<sup>[4-6]</sup>.同时,番茄具有优良的口感和食用价值,使其在食品加工和餐饮业中被广泛应用<sup>[7]</sup>.但是,在番茄种植过程中农药残留已成为限制番茄品质和食品安全的主要因素<sup>[8-10]</sup>.开展不同灌溉措施对设施番茄中农药残留及品质影响的研究,对于改进番茄品质、提高农产品安全性具有深远的意义.

在农业生产过程中,农药的使用是控制病虫害、提高农作物产量和品质的重要手段之一<sup>[11-12]</sup>.然而,不合理的农药使用可能导致农药过量残留,进而对农产品的安全性构成威胁<sup>[13]</sup>.在番茄种植中,常用的农药包括百菌清和高效氯氟菊酯等.百菌清是一种广谱杀菌剂,主要用于防治番茄生长过程中的真菌病害<sup>[14]</sup>,它可以干扰病原菌的细胞膜合成,从而杀死病菌.高效氯氟菊酯则是一种高效、低毒的杀虫剂,主要用于控制番茄上的害虫<sup>[15-16]</sup>,可通过干扰害虫的神经传导,导致害虫死亡.如果农药使用不合理,例如使用过量或不当使用,就可能导致农药在番茄果实中残留.这些残留的农药可以通过食物链传递给人类,从而对人体健康造成潜在危害<sup>[17-18]</sup>.因此,寻找一个既能保护植物健康又能降低农药残留的方法成为了当务之急.研究不同灌溉措施对番茄农药残留的影响,有助于合理使用农药,保障农产品的安全性.

滴灌能够直接将水分滴入土壤中,最大限度地减少水资源浪费<sup>[19]</sup>。通过滴灌,水分能够被精确地输送到作物的根部,确保作物吸收足够的水分,同时避免表土湿润,减少蒸发和流失<sup>[20-21]</sup>。这种灌溉方式能够提高水分利用率,减少农田水分蒸发,提高作物的产量和品质。地下滴灌能够更好地控制灌溉水量和养分供应<sup>[22]</sup>,通过将灌溉水管埋入土壤中,能够将水直接输送到作物的根部,避免表土的湿润和水分蒸发。这种灌溉方式能够提高水分利用率,提高作物产量和品质,同时避免土壤表面的盐分积累。微润灌溉将水分缓慢释放到土壤中,避免表土湿润和水分蒸发<sup>[23]</sup>。这种灌溉方式能够最大限度地减少水资源浪费,同时保证作物吸收足够的水分。通过微润灌溉,水分能够均匀地分布在土壤中,有利于作物的生长和发育。微喷灌能够增加土壤湿度和养分供应,通过微喷灌水分能够以细小的水滴形式喷洒在土壤表面,从而避免水分的大量流失和蒸发<sup>[24]</sup>。这种灌溉方式能够提高水分的利用率,提高作物的产量和品质,同时改善土壤的结构和通气性。

目前,在番茄种植研究领域缺少滴灌、地下滴灌、微润灌溉、微喷灌、沟灌效果的对比。本试验旨在研究不同灌溉措施对设施番茄农药残留及产量、品质的影响,采用田间试验方法通过设置不同灌溉方式,包括滴灌、地下滴灌、微润灌溉、微喷灌、沟灌等观察不同处理下番茄的生长情况、农药残留和品质指标变化。同时,对番茄品质指标进行系统分析,以评估不同灌溉措施对番茄品质的影响。本研究结果可为番茄种植提供科学依据,同时为农业节水、食品健康提供数据支撑。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)品种为“齐达利”,该品种种植广泛,具有良好的产量和品质表现。试验土壤容重为 1.36 g/cm<sup>3</sup>,土壤孔隙度为 49.2%,田间持水量(质量含水率)为 26.9%,pH 值为 7.90。土壤有机质含量为 218.3 g/kg,氮含量为 3.23 g/kg,碱解氮含量为 0.50 g/kg,有效磷含量为 16.77 mg/kg,速效钾含量为 152.92 mg/kg。在试验中采用大棚内穴盘育苗方法进行种苗培育,当秧龄达到 20 d 时,选取长势一致的种苗进行移栽,移栽后对番茄进行覆膜处理。为了保持试验的一致性,所有小区灌水量、施肥、打药等传统农艺管理措施均保持一致。

### 1.2 试验方法

本研究于 2023 年 3 月 20 日至 7 月 25 日在山东寿光地区的温室大棚内进行。试验共采用 5 种不同的灌溉方式,包括滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)和微喷灌(T4),并以传统沟灌(CK)作为对照(表 1)。每个小区内铺设 2 条地下灌溉带(滴灌、地下滴灌、微润灌溉、微喷灌),灌溉带之间间距为 50 cm。栽培小区长度为 8.0 m,宽度为 1.0 m,相邻小区之间间隔为 1.5 m,畦长为 8.0 m,畦面宽度为 0.6 m,畦高为 0.2 m。在移栽幼苗时将其种植行距设置为 0.5 m,株距设置为 0.4 m。每个小区内种植两行番茄植株。微喷灌处理组不进行覆膜,其他处理组在移栽后进行覆膜。在试验期间,对不同灌溉方式下的土壤水分含量进行监测。然后,对番茄产量进行测定,收获后对果实品质进行检测。

表 1 试验处理

| 序号 | 处理 | 灌溉方式 | 序号 | 处理 | 灌溉方式 |
|----|----|------|----|----|------|
| 1  | T1 | 滴灌   | 4  | T4 | 微喷灌  |
| 2  | T2 | 地下滴灌 | 5  | CK | 沟灌   |
| 3  | T3 | 微润灌溉 |    |    |      |

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 土壤水分

在小区中央预埋一根时域反射仪(TRIME-TDR)测量管,用于持续监测土壤水分。采用时域反射仪(TDR)探头保证测量的准确性,定期使用取土加热干燥法进行校正。在测量过程分 5 层进行监测,分别为[0~10) cm、[10~20) cm、[20~30) cm、[30~40) cm 和[40~50) cm。为了确保试验结果的可靠性,所

有处理均重复 3 次.

1.3.2 番茄农残指标

在番茄生长过程中,成熟期常见病害如灰霉病、晚疫病、叶霉病、灰叶斑病、细菌性斑点病等容易发生<sup>[25]</sup>.为了应对这些病害,本试验特别选在成熟期进行打药处理.采用 75%百菌清 WP 和高效氯氰菊酯 WP 进行喷洒.百菌清、高效氯氰菊酯喷洒量均为 3 kg/hm<sup>2</sup>.喷洒后的第 10 天对番茄进行采收.采收后,使用 Agilent 6890N 气相色谱仪对番茄残留的百菌清及高效氯氰菊酯进行检测<sup>[14]</sup>.

1.3.3 番茄产量及品质指标

本研究使用电子秤对番茄的单果质量和单株产量进行称量,并将其换算成每公顷的产量.测产后,采用钼蓝比色法来测定番茄中维生素 C 的含量<sup>[26]</sup>.番茄红素的提取则采用了二氯甲烷和石油醚等溶剂进行提取并测定<sup>[27]</sup>.果实总固形物的测定使用了手持测糖仪<sup>[26]</sup>.可滴定酸采用 NaOH 进行滴定<sup>[26]</sup>.

1.4 数据处理与统计分析

本研究使用 Microsoft Excel 2020 进行数据整理,显著性方面采用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行统计分析,使用 Duncan's 检测法对不同处理的差异显著性进行比较( $p<0.05$ ),并采用 Origin 2021 软件绘制图形.

2 结果分析

2.1 不同灌溉措施对番茄种植地土壤水分的影响

根据表 2 数据可知,不同灌溉方式对[0~10) cm 土层深度及[20~50) cm 土层深度土壤水分有显著性影响( $p<0.05$ ),对[10~20) cm 土层深度土壤水分无显著性影响( $p>0.05$ ).在[0~10) cm 土层中,沟灌(CK)处理提高了土壤水分含量,但减少了[20~50) cm 深处土壤水分,表明沟灌(CK)处理在表层土壤中能够有效地提供水分,但对于深层土壤的水分补给效果较差.在[0~10) cm 土层中,地下滴灌(T2)处理显著降低了表层土壤含水量( $p<0.05$ ),使土壤水分含量为 0.145%.这可能是由于地下滴灌(T2)系统将水直接输送到植物根系周围土壤中,减少了水分的蒸发和流失<sup>[28]</sup>.相反,在[40~50) cm 土层,地下滴灌(T2)处理显著增加了土壤含水量,说明地下滴灌(T2)系统能够有效地将水分输送到深层土壤中,提高深层土壤的水分含量.

表 2 不同灌溉措施对番茄种植地不同土层深度土壤水分的影响 %

| 序号 | 处理 | [0~10) cm    | [10~20) cm  | [20~30) cm   | [30~40) cm  | [40~50) cm   |
|----|----|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1  | T1 | 0.163±0.06ab | 0.181±0.09a | 0.265±0.09ab | 0.270±0.03a | 0.250±0.05a  |
| 2  | T2 | 0.145±0.15b  | 0.185±0.06a | 0.275±0.05a  | 0.286±0.06a | 0.260±0.09a  |
| 3  | T3 | 0.163±0.6ab  | 0.181±0.07a | 0.274±0.06a  | 0.267±0.09a | 0.246±0.07a  |
| 4  | T4 | 0.165±0.04ab | 0.188±0.06a | 0.262±0.06ab | 0.255±0.09b | 0.236±0.09ab |
| 5  | CK | 0.174±0.6a   | 0.193±0.06a | 0.224±0.09b  | 0.254±0.04b | 0.217±0.07b  |

注:表 2 中为观测值的平均值±标准差;相同列数据后的不同字母表示差异具有统计学意义( $p<5%$ ).下同.

2.2 不同灌溉措施对番茄农残的影响

由图 1 可知,滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、沟灌(CK)处理之间百菌清和高效氯氰菊酯残留含量无显著性差异( $p>0.05$ ).百菌清含量在滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、沟灌(CK)处理下主要集中于 0.337~0.356 mg/kg 范围内.在地下滴灌(T2)处理中,番茄百菌清残留量最高,最高检出量达 0.454 mg/kg,表明滴灌(T1)及沟灌(CK)处理可能导致了较高的百菌清残留.相比之下,微喷灌(T4)能够显著降低百菌清残留量( $p<0.05$ ).本研究发现,微喷灌(T4)处理下百菌清残留量最低,检出浓度为 0.246 mg/kg,可能是由于微喷灌(T4)提供了更均匀的水分分布和更小的水滴滴落直径,从而减少了百菌清在果实中的积累.高效氯氰菊酯残留检出量变化规律与百菌清相似.本研究还发现高效氯氰菊酯残留量在滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、沟灌(CK)处理下含量无显著性差异( $p>0.05$ ),检出值主要集中于 0.260~0.266 mg/kg 范围内.其中,微喷灌(T4)处理显著降低了高效氯

氰菊酯残留( $p<0.05$ ). 检测结果显示, 微喷灌(T4)处理下高效氯氰菊酯含量最低, 均值为 0.221 mg/kg.

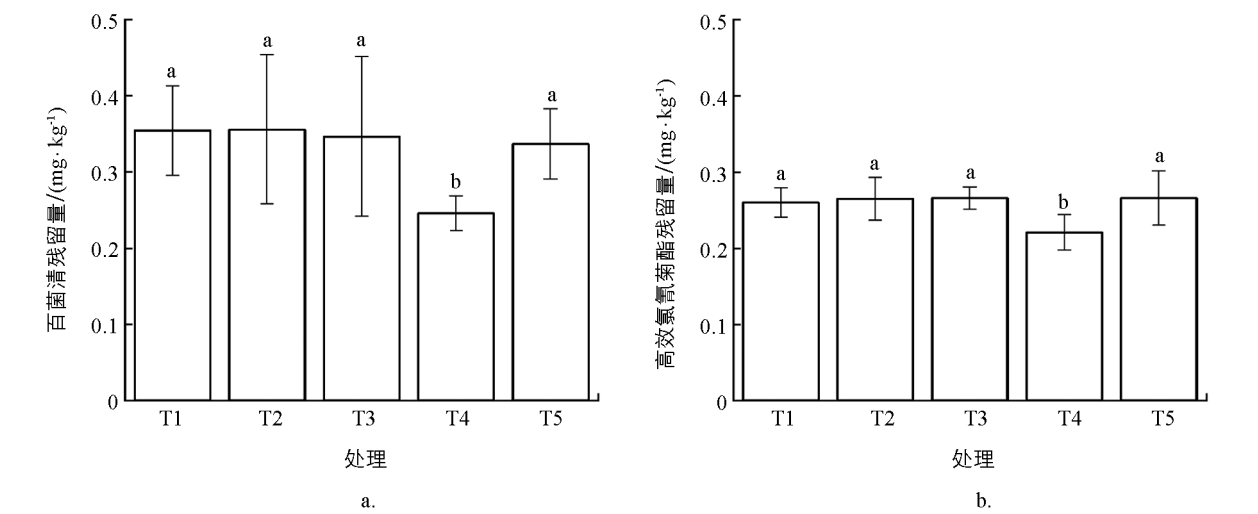


图 1 不同灌溉措施对番茄农残的影响

2.3 不同灌溉措施对番茄产量的影响

表 3 为不同灌溉措施对番茄产量的影响规律. 由表 3 可知, 不同灌溉措施对单果数量无显著性影响( $p>0.05$ ). 与沟灌(CK)相比, 滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、微喷灌(T4)处理均提高了平均单果质量. 微润灌溉(T3)平均单果质量最高, 达 124.6 g. 对产量研究发现, CK 处理总产量最低, 为 36.23 t/hm<sup>2</sup>. 相比之下, 滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)处理都比 CK 处理显著提高了总产量( $p<0.05$ ). 其中, 地下滴灌(T2)和微润灌溉(T3)的产量最高, 分别达到了 46.60 t/hm<sup>2</sup> 和 48.23 t/hm<sup>2</sup>.

表 3 不同灌溉措施对番茄产量的影响

| 序号 | 处理 | 单果数量/个    | 平均单果质量/g   | 总产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |
|----|----|-----------|------------|---------------------------|
| 1  | T1 | 9.4±1.2a  | 120.6±7.3a | 44.59±2.48ab              |
| 2  | T2 | 10.2±0.5a | 123.6±9.2a | 46.60±4.48a               |
| 3  | T3 | 9.6±0.5a  | 124.6±8.5a | 48.23±3.43a               |
| 4  | T4 | 9.4±0.9a  | 122.6±6.6a | 44.47±1.43b               |
| 5  | CK | 10.0±0.0a | 113.2±9.2b | 36.23±3.52c               |

2.4 不同灌溉措施对番茄营养品质的影响

如表 4 所示, 地下滴灌(T2)处理相较于沟灌(CK)显著提高了果实的维生素 C 含量( $p<0.05$ ), 且地下滴灌(T2)处理下番茄维生素 C 含量达到了 304 mg/kg. 虽然滴灌(T1)、微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)处理下的番茄维生素 C 含量均高于沟灌(CK)处理, 但未达到显著性水平( $p>0.05$ ). 微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)处理与沟灌(CK)相比显著提高了果实番茄红素含量, 分别达到了 45.26 和 46.36 μg/g. 然而, 滴灌和地下滴灌(T2)处理下的果实番茄红素含量与沟灌(CK)之间没有显著性差异( $p>0.05$ ). 但是, 滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)处理都能够提高番茄的维生素 C 和番茄红素含量.

表 4 不同灌溉措施处理对番茄维生素 C 及番茄红素的影响

| 序号 | 处理 | 维生素 C/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 番茄红素/(μg·g <sup>-1</sup> ) |
|----|----|------------------------------|----------------------------|
| 1  | T1 | 255±45ab                     | 43.71±13.51ab              |
| 2  | T2 | 304±135a                     | 43.91±13.52ab              |
| 3  | T3 | 267±40ab                     | 45.26±16.93a               |
| 4  | T4 | 267±47ab                     | 46.36±15.98a               |
| 5  | CK | 206±26b                      | 31.66±4.29b                |

2.5 不同灌溉措施对番茄口感品质的影响

如表 5 所示,不同灌溉措施对番茄可滴定酸含量没有显著性影响( $p>0.05$ ).滴灌(T1)、微喷灌(T4)和沟灌(CK)处理的总固形物含量显著高于地下滴灌(T2)和微润灌溉(T3)( $p<0.05$ ).其中,沟灌(CK)处理的总固形物含量最高,达到了 5.43%.微润灌溉(T3)处理下的总固形物含量最低,为 4.80%.在果实糖酸比方面,沟灌(CK)、滴灌(T1)处理显著高于微润灌溉(T3)( $p<0.05$ ).糖酸比最高值出现在沟灌(CK)处理,为 16.97,而最低值出现在微润灌溉(T3)处理,为 13.71.这些数据表明,不同灌溉措施对番茄品质和口感具有显著影响.

表 5 不同灌溉措施处理对番茄总固形物、可滴定酸及糖酸比的影响

| 序号 | 处理 | 总固形物/%     | 可滴定酸/%     | 糖酸比          |
|----|----|------------|------------|--------------|
| 1  | T1 | 5.39±0.13a | 0.33±0.10a | 16.33±5.01a  |
| 2  | T2 | 4.94±0.15b | 0.34±0.13a | 14.53±6.01ab |
| 3  | T3 | 4.80±0.11b | 0.35±0.12a | 13.71±5.01b  |
| 4  | T4 | 5.26±0.23a | 0.34±0.08a | 15.47±8.81ab |
| 5  | CK | 5.43±0.09a | 0.32±0.09a | 16.97±4.01a  |

3 讨论

3.1 不同灌溉措施对番茄种植地土壤水分的影响

灌溉是农业中重要的管理措施之一,不同灌溉方式可能会对土壤水分产生不同的影响,且不同灌溉措施对土壤水分的影响一直是近年来的研究热点.本研究发现,在不同灌溉处理下,[0~10) cm 和[20~50) cm 土层深度的土壤水分存在显著性差异( $p<0.05$ ),而在[10~20) cm 土层深度中没有显著性差异( $p>0.05$ ),表明灌溉方法的选择会对土壤水分分布及在土壤剖面中的运动产生重要影响.

沟灌(CK)可能导致表层土壤水分增加,但深层土壤水分减少的原因主要与该灌溉方法的水配模式和排水分特性有关.沟灌(CK)是通过在田间挖掘浅沟或形成通道将水引入这些渠道,当水分在这些渠道中流动时更容易在上层土壤中移动,使得地表径流增加,深层渗透减少<sup>[29]</sup>,导致表层土壤水分积累,而深层土壤水分则相对减少.这不仅影响了土壤中水分的垂直分布,使得深层土壤无法充分获得水分补给,还加剧了土壤水分分布的不均匀性.对于沟灌(CK)处理,本研究观察到其能够提供表层土壤水分,但对深层土壤的水分补给效果较差.这可能是因为沟灌(CK)处理导致水分在土壤中垂直分布不均匀,使得深层土壤无法充分获得水分补给所致(表 2).沟灌(CK)处理还可能导致土壤水分蒸发和流失.由于沟灌(CK)与滴灌、微润灌相比会导致无效蒸发增加,因此其实际水分利用效率更低<sup>[30]</sup>.由于深层土壤的渗透性较差,水分难以渗透到深层土壤中,导致深层土壤水分含量降低.

相比之下,本研究发现地下滴灌(T2)可显著降低表层土壤水分含量,使土壤水分含量降至 0.145%(表 2).这可能是由于地下滴灌(T2)系统将水分直接输送到植物根系周围的土壤中,减少了水分蒸发和流失.相反,在[40~50) cm 土层中地下滴灌(T2)处理显著增加了土壤含水量,说明地下滴灌(T2)系统能够有效地将水分输送到深层土壤中,提高深层土壤的水分含量.一个可能解释地下滴灌(T2)提高深层土壤水分的原因是其具有持续供水能力及供水位置较深的特点<sup>[31]</sup>.地下滴灌(T2)提供了一种持续供应水分的方法,可以直接将水分输送到植物根系所在的深层土壤中.这种持续供水有助于维持深层土壤的水分含量,即使在高蒸腾需求期间也能保持足够的水分供应.此外,地下滴灌(T2)系统的供水位置通常比传统灌溉方法更深,使得水分能够有效地输送到更深层的土壤中,为植物根系和微生物提供所需的水分.

除了地下滴灌(T2)外,微润灌溉(T3)也被证明可以提高深层土壤水分水平.微润灌溉(T3)通过小型喷嘴或喷雾器将水分散成细小的水滴,对灌溉水体进行雾化,从而使灌溉历时更久,灌溉均匀性更高<sup>[32]</sup>.这种方法相对于传统的喷灌或表面灌溉系统具有几个优势.① 微润灌溉(T3)通过减少径流和增加土壤持水量来降低用水量.② 它的细雾喷洒可以实现更好的水分分布均匀性,并能更好地控制单个植物的水分需

求。微润灌溉(T3)的细雾喷洒能够提供更加均匀的水分布,使得水分能够更好地渗透到深层土壤中。相比之下,传统的喷灌或表面灌溉方法往往会导致水分在表层土壤中积聚,而无法充分渗透到深层土壤中。微润灌溉(T3)的细雾喷洒可以减少水分蒸发和流失。由于水滴细小且均匀地分布在土壤中,使水分更容易被土壤吸收和保持,减少了水分损失。此外,微润灌溉(T3)还可以促进土壤中的毛细管作用,从而增强水分在土壤中的下渗能力。

### 3.2 不同灌溉措施对设施番茄农残的影响

研究表明,滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、沟灌(CK)处理之间百菌清和高效氯氟菊酯残留含量无显著性差异( $p>0.05$ )。在地下滴灌(T2)处理中,番茄百菌清残留量最高,最高检出量达 0.454 mg/kg。这可能是因为地下滴灌(T2)处理中,对地表扰动最小,导致其在土壤中积累较多。此外,滴灌(T1)处理也可能导致较高的百菌清残留。相比之下,微喷灌(T4)处理能够显著降低百菌清残留量( $p<0.05$ )。本研究发现,微喷灌(T4)处理下的百菌清残留量最低,检出含量为 0.246 mg/kg。这可能是因为微喷灌(T4)提供了更均匀的水分分布和更小的水滴滴落直径,从而减少了百菌清使用量及其在土壤中的积累。

本研究表明,微喷灌(T4)的冲刷作用能够降低百菌清残留量(图 1),这种降低可以归因于微喷灌(T4)技术的特点。微喷灌提供了更精确的水分和农药施用方式,从而实现了在整个作物冠层上的更均匀分布。这种均匀性有助于减少地表径流并大大提高植株表面的冲刷。与传统喷洒灌溉方法相比,微喷灌通常涉及更小的水滴尺寸,这些较小的水滴与植物表面接触面积更大,有助于更好地对植株及果实表层农药残留进行冲洗。

高效氯氟菊酯残留含量的检出量变化规律与百菌清相似。本研究发现,高效氯氟菊酯残留量在滴灌(T1)、地下滴灌(T2)、微润灌溉(T3)、沟灌(CK)处理下含量无显著性差异( $p>0.05$ ),检出值主要集中于 0.260~0.266 mg/kg 范围内。微喷灌(T4)处理显著降低了高效氯氟菊酯的残留( $p<0.05$ )。监测结果显示,微喷灌(T4)处理下高效氯氟菊酯含量均值为 0.221 mg/kg,可能是因为微喷灌(T4)的冲刷作用降低了表面残留物。本研究结果表明,滴灌(T1)和沟灌(CK)处理可能导致较高的百菌清和高效氯氟菊酯残留水平,这是由于此类灌溉方式增加了地表径流而对植株和果实表面无影响。相比之下,微喷灌(T4)可以有效降低这些农药的残留水平。虽然我们目前没有开展其他作物的试验,但有理由相信该研究结果在设施蔬菜种植过程中具有普遍规律,也可为其他设施蔬菜降低农残提供技术参考。

### 3.3 不同灌溉措施对设施番茄品质的影响

在农业生产中,灌溉是影响作物品质和产量的重要因素之一。本研究发现,地下滴灌(T2)相较于沟灌(CK)显著提高了果实的维生素 C 含量,其中番茄维生素 C 含量达到了 304 mg/kg(表 4)。微喷灌(T4)处理与沟灌(CK)相比显著提高了番茄果实的番茄红素含量。这可能是因为微喷灌(T4)系统提供了更均匀的水分分布,使得水分能够更好地渗透到土壤中,促进了番茄红素的合成和积累。相比之下,沟灌(CK)处理可能导致水分蒸发和流失,从而影响了番茄红素含量。微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)处理与沟灌(CK)相比显著提高了果实的番茄红素含量,分别达到了 45.26  $\mu\text{g/g}$  和 46.36  $\mu\text{g/g}$ 。滴灌(T1)和地下滴灌(T2)处理下果实的番茄红素含量与沟灌(CK)之间没有显著性差异,说明微润灌溉(T3)和微喷灌(T4)对果实的番茄红素含量提升效果较好。

不同灌溉措施对番茄可滴定酸含量没有显著性影响( $p>0.05$ )。滴灌(T1)、微喷灌(T4)和沟灌(CK)处理的总固形物含量显著高于地下滴灌(T2)和微润灌溉(T3)( $p<0.05$ )。其中,沟灌(CK)处理的总固形物含量最高,达到了 5.43%。微润灌溉(T3)处理下的总固形物含量最低,为 4.80%。在果实糖酸比方面,沟灌(CK)、滴灌(T1)处理显著高于微润灌溉(T3)( $p<0.05$ )。糖酸比最高值出现在沟灌(CK)处理,为 16.97,最低值出现在微润灌溉,为 13.71。这些数据表明,不同灌溉措施对番茄品质和口感具有显著影响。地下滴灌(T2)可能导致果实维生素 C 和番茄红素升高的原因可能是由于地下滴灌(T2)提供了稳定的水分供应,使得植物能够充分吸收土壤中的养分。此外,地下滴灌(T2)还可以减少水分蒸发和流失,提高水分利用效率,从而有利于植物的生长和发育。微喷灌(T4)可能导致果实番茄红素升高的原因可能是

由于微喷灌(T4)提供了均匀的水分布,使得植物能够充分吸收土壤中的养分.微喷灌(T4)还可以减少水分蒸发和流失,提高水分利用效率,从而有利于植物的生长和发育.充分灌溉可能导致果实中总固形物含量降低.这可能是因为充分灌溉会增加土壤中的水分含量,导致植物根系吸收水分中溶解的溶质含量降低,从而降低果实中总固形物含量.此外,过多的水分还可能导致植物根系无法充分吸收土壤中的养分,影响果实质量和口感,还可能导致土壤中氧气含量降低,影响根系呼吸作用和代谢过程,从而影响番茄品质.充足的水分会稀释土壤中的养分含量,导致植物无法充分吸收养分.因此,适度的灌溉是保持果实品质和口感的关键.

## 4 结论

沟灌可提高表层土壤[0~10) cm 的水分含量,但会降低深层土壤[30~50) cm 的水分含量.相比之下,地下滴灌和微润灌溉方式能够提高[20~50) cm 土层深度的水分分布均匀性.此外,微喷灌处理显著降低了百菌清和高效氯氰菊酯的残留含量.本研究发现,在微喷灌处理下百菌清和高效氯氰菊酯的含量分别为 0.246 mg/kg 和 0.221 mg/kg.与沟灌相比,滴灌、地下滴灌、微润灌溉和微喷灌番茄的平均单果质量分别提高了 6.5%,9.2%,10.1%和 8.3%;总产量分别提高了 23.1%,28.6%,33.1%和 22.7%;但对单株果实数量没有显著影响.对品质进行分析发现,地下滴灌可以显著提升果实中的维生素 C 含量,而微润灌溉和微喷灌则可以显著提高果实中的番茄红素含量.然而,与沟灌相比,地下滴灌和微润灌溉均导致总固形物含量降低.

## 参考文献:

- [1] 张利平,夏军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.
- [2] 翟龙.高效节水灌溉技术在农田水利工程中的应用要点[J].世界热带农业信息,2023(7):39-41.
- [3] 李君明,项朝阳,王孝宣,等.“十三五”我国番茄产业现状及展望[J].中国蔬菜,2021(2):13-20.
- [4] 霍建勇,刘静,冯辉,等.番茄果实风味品质研究进展[J].中国蔬菜,2005(2):34-36.
- [5] 张雪梅,王雨熙,朱沿舟,等.胺鲜酯对树番茄幼苗养分吸收和生理指标的影响[J].云南农业大学学报(自然科学版),2023,38(4):606-614.
- [6] 史晓晶,王华杰,石瑞,等.番茄早疫病菌啉菌噁唑抗性菌株的适合度[J].云南农业大学学报(自然科学版),2022,37(4):553-558.
- [7] GARCIA E, BARRETT D M. Evaluation of Processing Tomatoes from Two Consecutive Growing Seasons: Quality Attributes, Peelability and Yield[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2006, 30(1): 20-36.
- [8] 王静,薛芒,陈欣欣,等.日光温室蔬菜中百菌清残留状况及不同处理对其的影响[J].安全与环境学报,2005,5(2):79-82.
- [9] NAGATA T, DOBASHI H, IJIMA K, et al. Comparison of Adherence Tendencies of Pesticide Residues Sprayed on Small-, Medium-, and Large-Sized Tomatoes[J]. Journal of Pesticide Science, 2021, 46(4): 352-359.
- [10] WANWIMOLRUK S, DUANGSUWAN W, PHOPIN K, et al. Food Safety in Thailand 5: The Effect of Washing Pesticide Residues Found in Cabbages and Tomatoes[J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2017, 12(3): 209-221.
- [11] 王文颀,高昶,李鹏霞,等.植物用农残净化素喷施燕麦效果试验[J].畜牧兽医杂志,2023,42(1):18-19.
- [12] 段研,刘新,丁素萍.战氏生物农残降解剂草莓田间试验研究[J].农业科技通讯,2006(1):48-49.
- [13] 袁水霞,孙斌,张慎璞,等.5种番茄品种对烟粉虱寄主选择、生长发育及存活率的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(9):48-52.
- [14] 许晓梅,王文桥,潘文亮,等.百菌清在黄瓜、番茄加工前后的残留变化[J].农药,2006,45(12):845-846,848.
- [15] WHANGCHAI K, VAN HUNG T, AL-RASHED S, et al. Biodegradation Competence of Streptomyces Toxytricini D2 Isolated from Leaves Surface of the Hybrid Cotton Crop Against  $\beta$ Cypermethrin[J]. Chemosphere, 2021, 276: 130152.
- [16] HUANG Z, ALI S, REN S X. Insecticidal Activity Influence of Beta-Cypermethrin on the Pathogenicity of Beauveria Bassiana Against Aleurodicus Disperses[J]. Crop Protection, 2013, 45: 104-108.

[17] 谭壮生, 齐丽娟, 敬海明, 等. 基于 QSAR 预测模型的有机磷类农药急性毒性的健康风险评估 [J]. 毒理学杂志, 2023, 37(3): 189-193.

[18] 杨琪, 王娅芳, 李磊, 等. 2020—2022 年贵州省市售蔬菜中农药残留特征分析及健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2023, 50(18): 3425-3430.

[19] 杜清洁, 李建明, 潘铜华, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17.

[20] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 110-121.

[21] 李仙岳, 陈宁, 史海滨, 等. 膜下滴灌玉米番茄间作农田土壤水分分布特征模拟 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 50-59.

[22] 田义, 张玉龙, 虞娜, 等. 温室地下滴灌灌水控制下限对番茄生长发育、果实品质和产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 88-92.

[23] 夏天, 田军仓. 痕量灌溉与微润灌溉技术研究进展及对比分析 [J]. 节水灌溉, 2017(8): 96-100.

[24] 肖林刚, 马艳, 宋兵伟, 等. 温室膜下微喷灌溉技术研究进展 [J]. 新疆农业科学, 2023, 60(7): 1731-1740.

[25] 刘雅婷, 李鑫, 李永忠, 等. 番茄斑萎病毒属 ssRNA-M 序列比对分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(12): 1-7.

[26] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[27] 张连富, 丁霄霖. 番茄红素简便测定方法的建立 [J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(3): 51-55.

[28] 李耀霞, 郁继华, 张国斌, 等. 灌水上限和施肥量对温室番茄根际土壤酶及微生物活性的影响 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58(24): 128-133.

[29] 李红峥, 曹红霞, 郭莉杰, 等. 沟灌方式和灌水量对温室番茄综合品质与产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4179-4191.

[30] 孙景生, 康绍忠, 王景雷, 等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 28-32.

[31] 杨雪, 刘旭飞, 韩梦雪, 等. 不同氮肥液浓度下微孔陶瓷根灌土壤水氮运移与流失特性的数值模拟研究 [J]. 节水灌溉, 2023(9): 71-79, 87.

[32] 张子卓, 张珂萌, 牛文全, 等. 微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 122-129.

责任编辑 夏娟