

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.05.005

邢天琪, 杜韵, 黄健, 等. 微润灌溉布设方式对芹菜品质及农残的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 53-62.

微润灌溉布设方式对芹菜品质及农残的影响

邢天琪¹, 杜韵², 黄健¹, 刘秀萍¹,
王颖¹, 李小凤¹, 王全红¹, 李元³

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. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要: 芹菜因其营养丰富、口感清脆、香味独特而受到大众的广泛喜爱。然而, 芹菜对水分条件极为严格。微润灌溉作为新兴的灌溉技术, 对现代农业可持续发展起到重要作用。现阶段, 微润灌溉布设方式对芹菜生长及其品质影响的相关研究尚不清晰。通过设置不同的微润管埋深(10 cm 和 20 cm)及铺设密度, 探究其对芹菜长势、叶片 SPAD、产量、品质、矿质元素含量、农残以及灌溉水利用效率的影响。结果表明: 在微润管埋深 10 cm, 采用 3 管 2 行的管道铺设方式下, 芹菜在株高、茎粗、叶柄长、宽以及分蘖数等生长指标上表现最优; 微润灌溉显著提高了芹菜的维生素 C、香精油、Ca 和 Mg 的含量, 并降低了粗纤维含量; 随铺设密度的增加, 水分利用效率有所降低。研究还发现, 微润灌溉可显著降低百菌清及高效氯氟菊酯的残留量。综合考虑长势、营养品质和水利用效率, 发现微润管埋深 10 cm, 采用 3 管 2 行的管道铺设方式是优化芹菜种植的有效方法, 可实现芹菜生长性能和品质的提升, 同时提高水资源利用效率。

关键词: 微润灌溉; 芹菜; 农残; 品质; 产量

中图分类号: S636.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2025)05-0053-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Impact of Micro-Irrigation Layout Methods on the Quality and Pesticide Residues of Celery

XING Tianqi¹, DU Yun², HUANG Jian¹, LIU Xiuping¹,
WANG Ying¹, LI Xiaofeng¹, WANG Quanhong¹, LI Yuan³

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. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Celery is widely favored by the public for its rich nutrients, crisp texture, and unique aroma.

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 陕西省社会科学基金专项项目(2023SJ03); 教育部人文社会科学项目(24YJCZH156); 北京市科技处重点研发计划项目(Z191100004019024); 西安市科技计划项目(24NYGG0072)。

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

However, celery is extremely sensitive to water conditions. Micro-irrigation, as an emerging irrigation technology, has gradually become an important tool for promoting the sustainable development of modern agriculture. At present, there is limited research on the impact of micro-irrigation layout methods on the growth and quality of celery. In this study, we aimed to explore the effects of different moistube burying depths (10 cm and 20 cm) and laying densities of micro-irrigation belts on the growth, leaf SPAD, yield, quality, mineral element content, irrigation water use efficiency, and pesticide residues of celery. The results showed that under the conditions of a buried depth of 10 cm and a layout of 3 pipes in 2 rows, celery plants exhibited the optimal performance in growth indicators such as plant height, stem diameter, petiole length, width, and tiller number. Micro-irrigation significantly increased the content of vitamin C, essential oils, calcium, and magnesium in celery, and reduced the crude fiber content. However, with the increase of laying density, water use efficiency decreased. The study also found that micro-irrigation significantly reduced the residues of chlorothalonil and cypermethrin. Taking into account of growth performance, nutritional quality and water use efficiency, this study found that a buried depth of 10 cm and a layout of 3 pipes in 2 rows is an effective method for optimizing celery cultivation. It can improve the growth performance and quality of celery, while enhance the water resource utilization efficiency.

Key words: micro-irrigation; celery; pesticide residues; quality; yield

芹菜作为一种在全球范围内被广泛种植且口感独特、营养价值极高的蔬菜,在人们的饮食中占据了重要地位^[1]。从营养角度来看,芹菜具有低热量、高纤维、高矿物质和维生素的特点,其茎叶组织富含类黄酮、酚酸等生物活性物质,具有降血压、抗氧化等药理活性,对保持身体健康有着重要的作用^[2]。芹菜中的维生素 C 含量丰富,这种维生素对于增强人体免疫力有着良好的效果,可帮助人们更好地抵抗各种疾病。同时,芹菜中的膳食纤维也是其一大亮点。高膳食纤维有助于调节肠道功能,改善便秘等消化系统问题,对于维护肠道健康具有重要意义^[3]。膳食纤维还可以增加饱腹感,有助于控制体重,对于追求健康生活方式的人们来说是一种理想的食物^[4]。然而,在实际种植过程中,芹菜对水分的管理要求极为严格^[5]。不恰当或者不规律的灌溉方式会对芹菜的生长发育产生负面影响,导致产量下降和品质劣化^[6]。

随着全球气候变化和人口增长,提升农业用水效率已成为保障粮食安全的战略重点^[7-9],研发和应用高效节水灌溉技术显得尤为迫切和重要。传统的灌溉方式,如大水漫灌,虽然能够满足作物的基本水分需求,但其效率低下,存在诸多弊端。大水漫灌往往导致大量的水资源浪费,由于水流冲击和浸泡,还会引发土壤的侵蚀和结构破坏,进一步加剧水资源短缺的问题^[10-11]。此外,过度灌溉还可能导致地下水位上升、盐碱化等问题,对农田生态环境造成负面影响^[12-13]。

施用农药对于防治病虫害、提高产量起到了不可或缺的作用^[14]。然而,许多农药具有毒性,长期摄入可能导致慢性中毒、生殖系统损伤、免疫系统紊乱、癌症等健康问题。特别是对于儿童、孕妇和老人等敏感人群,农药残留的危害更加显著^[15-16]。

在众多新兴的灌溉技术中,微润灌溉作为一种局部、精准的灌溉方式,展现出了显著的节水、节肥、增产、提质等优势,推动了现代农业可持续发展^[17-18]。微润灌溉的核心原理是通过特制的半透膜材料,缓慢而持续地将适量的水分和营养物质输送到植物的根部区域,创造出一个优化的生长环境。相比传统的灌溉方式,微润灌溉具有以下显著优点:首先,微润灌溉能有效减少水分的蒸发和浪费,确保水分得到最大限度的利用,这对于干旱和半干旱地区农业生产尤为重要^[19-20];其次,微润灌溉能够提供稳定的土壤湿度和养分供应,有利于作物根系的生长和发育,进而增强作物对病虫害的抵抗能力,降低对农药的依赖。这种

技术的应用不仅有助于提高水分的利用效率, 有利于实现节水、高效、安全、环保的农业发展目标, 还可以减少养分的流失, 实现精确施肥, 从而节约肥料资源并减少其对环境的污染。因此, 微润灌溉技术的发展对于推动农业现代化进程具有重要意义。

现阶段, 微润灌溉技术在番茄种植领域已有一些相关研究。研究表明, 微润灌溉能够显著提高土壤含水量, 降低土壤含盐量, 同时提升番茄的产量, 并增加种植的净利润^[19]。然而, 在芹菜种植领域, 关于微润灌溉技术的研究却相对匮乏。因此, 探究微润灌溉在芹菜种植中的适用性及其对芹菜生长发育、产量、品质及农残的影响, 显得尤为迫切和重要。本研究通过设置不同微润管铺设埋深及铺设方式, 观测和分析芹菜长势、叶片 SPAD、产量、品质及农残等指标值的变化情况, 评估不同灌溉措施对芹菜品质及农残的影响。本研究有助于了解微润灌溉在芹菜种植中的应用效果, 为农业生产者提供科学依据, 推动农业向节水、高效、安全、环保的方向发展。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选择广泛种植的芹菜品种百利西芹作为供试芹菜, 该品种种植广泛, 喜冷、凉气候。为了确保试验的准确性, 在种植前对土壤基础理化性质进行测定。试验用土容重为 1.32 g/cm³, 孔隙度为 49.5%, 田间持水量为 27.9%, pH 值为 7.60。土壤有机质含量为 21.02 g/kg。育苗阶段, 采用了穴盘育苗的方法。当幼苗高度达到约 10 cm 且具有 4~5 片叶子时, 选取长势一致的种苗进行移栽定植, 这一步骤的目的是确保试验中的植物生长状况相对一致, 减少因个体差异而导致的误差。为了保持试验的一致性, 对所有小区进行了统一的农艺管理措施, 包括施肥和打药等传统农业管理方法。在定植后 50 d, 喷洒百菌清、高效氯氰菊酯, 浓度均为 2.70 kg/hm²。

1.2 试验方法

试验在山东寿光地区温室大棚内进行。根据微润管埋深和铺设密度共采用了两种不同的灌溉方式。定植后, 覆盖地膜以保持湿度。每个小区的畦长为 8.0 m, 宽为 0.6 m, 小区间隔为 2.0 m。温室芹菜于 2022 年 10 月 7 日定植, 于 2023 年 1 月 10 日全部收获, 生育期共计 95 d。每个小区内种植了两行芹菜植株。在试验过程中, 设置了 6 个微润灌溉处理, 以漫灌(CK)处理作为对照, 共 7 个处理(表 1)。所有小区随机排列。每个处理设置 3 个重复, 共计 21 个小区。芹菜种植株距为 0.20 m, 行距为 0.15 m。

表 1 微润灌溉布设方式

序号	处理	微润管埋深/cm	管道铺设方式	序号	处理	微润管埋深/cm	管道铺设方式
1	T1	10	1 管 2 行	5	T5	20	2 管 2 行
2	T2	10	2 管 2 行	6	T6	20	3 管 2 行
3	T3	10	3 管 2 行	7	CK	—	—
4	T4	20	1 管 2 行				

1.3 观测指标测定的方法

1.3.1 芹菜长势指标

外观性状调查: 利用游标卡尺测定叶柄粗, 直尺测量芹菜全株高度, 调查单株分蘖数。每个处理设置 3 个重复, 结果取平均值。

1.3.2 芹菜叶片 SPAD 值

采用叶绿素仪(SPAD-502, 日本东京, 美能达公司)测定叶片的 SPAD 值。

1.3.3 芹菜产量及品质

定植后 95 d 进行收获,选取 6 株芹菜去掉根部,洗净,以地上部分鲜质量作为产量。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[21],维生素 C 含量采用 2,6-二氯靛酚法测定^[22],粗纤维含量占比采用聚酯纤维筛网袋法测定^[23],香精油含量用溴化钾-溴酸钾标准液滴定法测定^[23]。

1.3.4 芹菜矿物元素含量

芹菜样品经过了 HNO₃-HClO₄ 消解,这一步骤是为了释放和提取样品中的被测元素。随后,采用原子吸收分光光度计对芹菜中的 Ca、Mg 含量进行了测定^[24]。

1.3.5 水分利用效率

灌溉水利用效率(*IWUE*)是评估灌溉系统效率的重要指标,其计算公式为

$$IWUE = \frac{Y}{I}$$

(1)

其中: *Y* 代表芹菜的产量, *I* 代表芹菜全生育期的灌水量。

1.3.6 农残指标

采摘测产后,使用气相色谱仪对芹菜残留百菌清及高效氯氰菊酯进行检测。

1.4 数据处理与统计分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理。在统计分析方面,为了准确评估不同处理之间的差异显著性,采用 SPSS 25.0 软件,通过 Duncan's 检测法,对不同处理间的差异显著性进行了比较,显著性水平设为 $p<0.05$ 。使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 微润灌溉布设方式对芹菜长势的影响

根据表 2 的数据可知,微润灌溉布设方式对芹菜的株高、茎粗、叶柄长、宽及分蘖数的影响有统计学意义($p<0.05$)。研究发现,微润管理深 10 cm 处理下芹菜的长势优于埋深 20 cm 处理。研究还发现,微润带铺设密度越大,长势总体越好。具体来说,长势指标最大值均出现于 T3 处理。在 T3 处理下,芹菜的株高平均值最大,为 69.25 cm,而 CK 处理下的株高平均值最小,为 60.12 cm。茎粗的变化规律与株高相似。T3 处理下的茎粗平均值最大,为 40.12 mm,而 CK 处理下的茎粗平均值最小,为 36.51 mm。对于叶柄长,T3 和 T6 处理表现最优。而叶柄宽的最佳处理是 T2、T3 和 T6。T3 处理下的分蘖数明显大于 CK 处理($p<0.05$),但不同微润灌溉铺设方式之间的分蘖数差异并无统计学意义($p>0.05$)。

表 2 微润灌溉布设方式对芹菜长势的影响

处理	株高/cm	茎粗/mm	叶柄长/cm	叶柄宽/cm	分蘖数
T1	63.47±5.94b	37.59±0.99ab	50.95±2.16ab	22.46±1.64ab	5.67±0.94ab
T2	65.11±3.98b	39.92±1.68a	51.54±3.16ab	23.45±1.69a	5.00±0.82ab
T3	69.25±5.45a	40.12±1.44a	53.20±2.55a	24.12±2.65a	6.33±0.94a
T4	62.46±3.94b	37.12±1.16ab	49.97±2.65b	21.93±2.10ab	5.67±1.25ab
T5	64.79±4.50b	37.86±1.64ab	50.95±2.69ab	22.46±0.96ab	5.33±0.94ab
T6	66.74±4.65ab	38.45±0.95ab	52.51±2.70a	23.47±1.65a	5.67±0.94ab
CK	60.12±3.12c	36.51±2.18b	49.31±3.55b	21.07±1.50b	4.67±0.94b

注:表中 63.47±5.94 表示观测值的平均值±标准差,用于描述数据的分布情况。相同列数据后的不同字母表示这些数据的差异有统计学意义, $p<0.05$ 。以下各表相同。

2.2 微润灌溉布设方式对芹菜叶片 SPAD 值的影响

由表 3 可看出, 微润灌溉布设方式对芹菜定植后 30 d 的叶片 SPAD 值的影响无统计学意义($p>0.05$), 但对定植后 60 d 和 90 d 的叶片 SPAD 值的影响有统计学意义($p<0.05$)。分析数据发现, 在定植后 60 d 和 90 d, T3 处理下的芹菜叶片 SPAD 值平均值最大, 而 CK 处理下的叶片 SPAD 值的平均值最小。此外, 还发现, 各微润灌溉铺设方式之间对 60 d 和 90 d 的叶片 SPAD 值的影响没有统计学意义($p>0.05$)。然而, 与漫灌(CK)处理相比, 微润灌溉处理显著提高了 60 d 和 90 d 的叶片 SPAD 值($p<0.05$)。

表 3 定植后不同天数芹菜 SPAD 值

处理	定植后天数/d		
	30	60	90
T1	27.87±4.36a	40.2±3.65ab	41.69±2.06ab
T2	27.23±2.54a	41.28±4.06ab	42.11±1.46a
T3	28.56±2.44a	41.85±2.65a	42.31±2.01a
T4	28.73±3.21a	40.68±3.10ab	41.79±1.88ab
T5	29.65±4.96a	41.15±2.19ab	41.69±2.93ab
T6	27.32±4.19a	40.45±2.13ab	41.98±2.33a
CK	29.26±1.52a	39.16±1.02b	39.65±2.12b

2.3 微润灌溉布设方式对芹菜产量的影响

对图 1 进行分析, 发现微润灌溉布设方式对芹菜产量的影响有统计学意义($p<0.05$)。具体而言, T2、T3 和 T6 处理下的芹菜产量显著高于 T1、T4、T5 和 CK 处理($p<0.05$)。其中, T2、T3 和 T6 处理下的芹菜产量分别为 21 987.45 kg/667 m²、22 085.81 kg/667 m²、21 845.61 kg/667 m²。而 CK 处理下的芹菜产量最低, 为 19 915.51 kg/667 m²。研究表明, 微润灌溉布设方式对芹菜的产量的影响有统计学意义。在实际应用中, 可根据这些结果来优化微润灌溉的管理策略, 以提高芹菜的产量和经济效益。

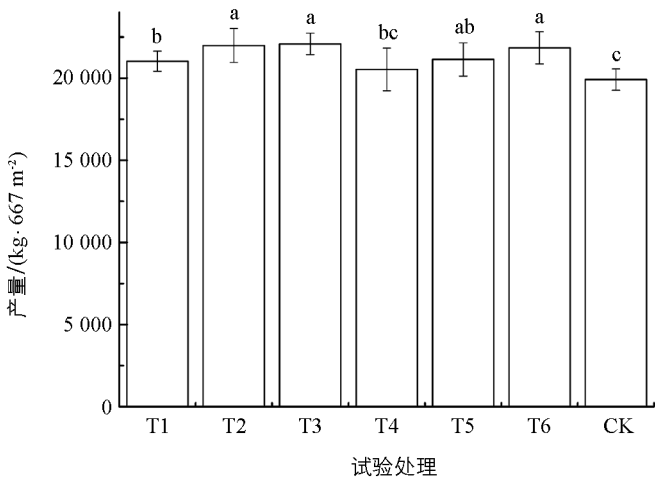


图 1 微润灌溉布设方式对芹菜产量的影响

2.4 微润灌溉布设方式对芹菜品质的影响

对表 4 进行分析, 发现微润灌溉布设方式对芹菜的可溶性蛋白含量的影响没有统计学意义($p>0.05$)。但对维生素 C 含量、粗纤维含量占比和香精油含量的影响有统计学意义($p<0.05$)。具体而言, 在维生素 C 含量方面, T3 处理下的芹菜维生素 C 含量最高, 平均值达到 16.20 mg/g, 而 CK 处理下的维生素 C 含量最低, 平均值为 13.68 mg/g。研究还发现, 相同的微润管铺设密度下, 微润管理深 10 cm 处理下的维生素 C 含量要普遍高于埋深 20 cm 处理。对于粗纤维含量占比而言, CK 处理下粗纤维含量占比最高, 平均值为 1.05%, T3 处理下粗纤维含量占比最低, 平均值为 0.75%。对香精油含量分析发现, T3 处理下香精油含量最高, 平均值为 56.54 mg/kg, CK 处理下香精油含量最低, 平均值为 32.65 mg/kg。

表 4 微润灌溉布设方式对芹菜品质的影响

处理	可溶性蛋白含量/ (mg · g ⁻¹)	维生素 C 含量/ (mg · g ⁻¹)	粗纤维含量占比/ %	香精油含量/ (mg · kg ⁻¹)
T1	1.31±0.25a	14.48±1.64b	0.85±0.06b	48.45±5.94b
T2	1.25±0.37a	14.02±2.64b	0.79±0.10b	50.12±4.95ab
T3	1.31±0.37a	16.20±3.92a	0.75±0.16b	56.54±3.11a
T4	1.28±0.19a	13.57±3.31bc	0.92±0.16ab	45.12±5.65b
T5	1.29±0.03a	15.96±2.69ab	0.86±0.08b	49.98±5.12b
T6	1.29±0.23a	15.79±2.10ab	0.81±0.10b	52.45±4.56ab
CK	1.24±0.11a	13.68±2.69c	1.05±0.12a	32.65±7.56c

2.5 微润灌溉布设方式对芹菜矿物元素含量的影响

根据表 5 的数据,分析微润灌溉布设方式对芹菜矿物元素含量的影响。对于 Ca 的含量,分析结果表明,除 T3 处理外,各微润灌溉布设方式之间对芹菜的 Ca 含量的影响没有统计学意义($p>0.05$)。然而,与漫灌(CK)处理相比,微润灌溉处理显著提高了芹菜 Ca 的含量($p<0.05$)。在所有处理中,T3 处理的 Ca 含量最高,平均值达到了 18.95 mg/g,而 CK 处理的 Ca 含量最低,平均值为 16.56 mg/g。对于 Mg 的含量进行分析,各微润灌溉布设方式之间对芹菜的 Mg 含量的影响没有统计学意义($p>0.05$)。但与漫灌(CK)处理相比,微润灌溉处理显著提高了芹菜 Mg 的含量($p<0.05$)。在所有处理中,T3 处理的 Mg 含量最高,达 4.01 mg/g,而 CK 处理的 Mg 含量最低,为 3.54 mg/g。尽管不同的微润灌溉布设方式之间对芹菜 Ca 和 Mg 含量的影响没有统计学意义($p>0.05$),但传统的漫灌方式相比,微润灌溉显著提高了这两种矿物元素在芹菜中的含量($p<0.05$)。进一步说明微润灌溉在改善芹菜品质方面的优势。通过合理的微润灌溉布设方式和管理,不仅可以提高芹菜的产量,还能显著提升其矿物元素含量,从而更好地满足消费者的需求。

表 5 微润灌溉布设方式对芹菜矿物元素含量的影响 mg · g⁻¹

处理	Ca 的含量	Mg 的含量	处理	Ca 的含量	Mg 的含量
T1	17.92±2.12ab	3.90±0.19a	T5	18.01±1.95ab	3.85±0.21a
T2	18.10±2.22ab	3.94±0.21a	T6	18.11±1.78ab	3.96±0.24a
T3	18.95±1.97a	4.01±0.31a	CK	16.56±1.39b	3.54±0.21b
T4	17.75±1.56ab	3.81±0.20a			

2.6 微润灌溉布设方式对芹菜灌溉水利用效率的影响

通过对芹菜灌溉水利用效率的深入分析(图 2),发现微润灌溉布设方式对芹菜灌溉水利用效率的影响有统计学意义($p<0.05$)。在所有处理中,T4 处理下芹菜灌溉水利用效率最高,达 146.65 kg/667 m²。微润灌溉处理下,T3 处理的水分利用效率最低。CK 处理下芹菜灌溉水利用效率最低,为 71.13 kg/667 m²。这一结果明确显示了微润灌溉技术相较于传统漫灌方式在提升水分利用效率方面的优势。此外,研究还发现,在微润管埋深方面,埋深为 20 cm 的处理相较于埋深为 10 cm 的处理,其灌溉水

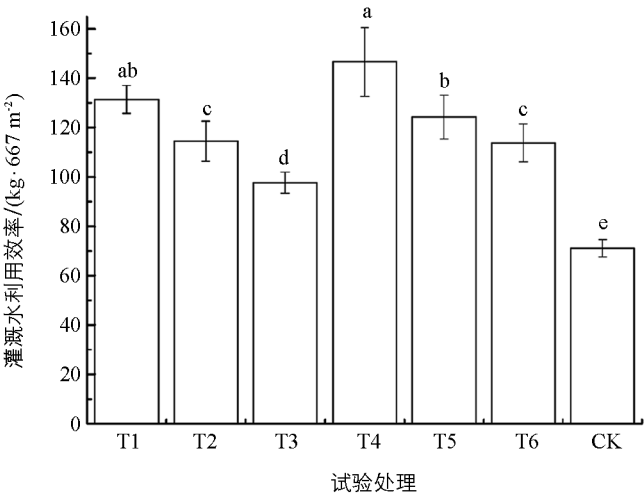


图 2 微润灌溉布设方式对芹菜灌溉水利用效率的影响

利用效率更高。这主要是因为 20 cm 埋深处理下微润带流量低于 10 cm 埋深处理, 其次, 20 cm 埋深处理能够更好地减少水分蒸发和流失, 从而提高水分利用效率。

2.7 微润灌溉布设方式对农残的影响

由表 6 可知, 各微润灌溉布设方式对百菌清残留差异的影响无统计学意义($p>0.05$)。与 CK 处理相比, 微润灌溉显著降低了百菌清残留量($p<0.05$)。其中, T3 处理下百菌清残留量最低, 平均值为 0.15 mg/kg。CK 处理下百菌清残留量最高, 平均值达 0.24 mg/kg。与 CK 处理相比, 微润灌溉显著降低了高效氯氰菊酯的残留量。其中, CK 处理下高效氯氰菊酯残留量最高, 平均值达 0.19 mg/kg。T3 处理下, 高效氯氰菊酯残留量最低, 平均值为 0.10 mg/kg。

表 6 微润灌溉布设方式对农残的影响 mg · kg⁻¹

处理	百菌清的残留量	高效氯氰菊酯的残留量	处理	百菌清的残留量	高效氯氰菊酯的残留量
T1	0.20±0.03ab	0.12±0.03b	T5	0.20±0.03ab	0.14±0.04b
T2	0.18±0.04ab	0.12±0.02b	T6	0.18±0.05ab	0.12±0.02b
T3	0.15±0.05b	0.10±0.01c	CK	0.24±0.03a	0.19±0.03a
T4	0.20±0.02ab	0.14±0.03b			

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 微润灌溉布设方式对芹菜长势及产量的影响

微润灌溉作为一种创新的节水灌溉技术, 其优势在于能够实现精确、稳定的水分供应, 从而有效避免土壤过干或过湿的情况, 这对于保持芹菜等作物的正常生长和发育至关重要^[25]。相较于传统的漫灌方式, 微润灌溉通过减少水分的无效流失和浪费, 显著提高了水的利用效率, 符合现代农业对节能、环保和可持续发展的要求。

研究结果显示, 不同的微润管埋深和铺设密度对芹菜的株高、茎粗、叶柄长、宽以及分蘖数等生长指标的差异有统计学意义。其中, T3 处理下的芹菜在所有生长指标上表现最优, 这表明微润管埋深 10 cm 相较于 20 cm 更有利于芹菜的生长。这可能是由于芹菜属浅根系作物, 较浅的微润管埋深能够让根系更有效地吸收和利用水分, 促进其生长发育^[26]。此外, 微润灌溉的布设方式对芹菜的生长特性的影响有统计学意义。通过调整微润管的埋深和铺设密度等参数, 可以实现对芹菜生长的精细化管理。在本研究中, 采用 3 管 2 行的铺设方式下, 芹菜的长势最佳。这一现象可能与微润管的独特工作原理有关, 由于微润管无滴头设计, 主要依靠微润管壁外渗水进行灌溉, 因此, 较高的铺设密度可以提高单位面积的灌水量, 为芹菜提供更为充足的水分供应, 促进其生长^[27-28]。

大水漫灌往往会导致水分不均匀地分布在植物表面, 使得芹菜叶片出现枯黄、萎缩等现象^[29-30]。而微润灌溉可以提供稳定的水分供应, 使芹菜叶片保持鲜绿、饱满的状态。对叶片的 SPAD 值进行测定, 发现微润灌溉布设方式在定植后 30 d 对叶片 SPAD 值的影响无统计学意义, 但在定植后 60 d 和 90 d 对叶片 SPAD 值的影响有统计学意义。T3 处理在 60 d 和 90 d 叶片的 SPAD 值最大, 表明微润灌溉处理能够有效地提高芹菜叶片的叶绿素含量, 可能有利于增强光合作用, 改善植物的营养状况。对产量进行分析发现, T2、T3 和 T6 处理下的芹菜产量明显高于 T1、T4、T5 和 CK 处理, 其中 T3 处理的产量最高(图 1)。这证实了微润灌溉技术在提升芹菜产量方面的优势。

3.1.2 微润灌溉布设方式对芹菜品质的影响

微润灌溉布设方式对芹菜品质的影响主要体现在营养成分和矿物元素含量两方面。研究发现,微润灌溉显著提高了维生素 C、香精油的含量,特别是 T3 处理表现出最佳效果。对于矿物元素含量,虽然不同的微润灌溉布设方式之间对 Ca 和 Mg 含量的影响无统计学意义,但与传统的漫灌方式相比,微润灌溉显著提高了 Ca 和 Mg 两种矿物元素的含量,其中 T3 处理同样表现出优势。这些结果表明微润灌溉可以提供稳定的水分和养分供应,促进芹菜对土壤中矿物元素的吸收和利用,提高其营养价值。

研究发现,微润灌溉还可以改善芹菜的口感和风味。采用微润灌溉的处理(如 T3)相较于 CK 处理,其粗纤维含量较低。较低的粗纤维含量通常与更好的口感和更高的食用价值相关,因此,微润灌溉有助于提升芹菜的食用品质。维生素 C 是衡量蔬菜营养价值的重要指标之一。研究结果显示,T3 处理下的维生素 C 含量最高,而 CK 处理下的维生素 C 含量最低。这表明合理的微润灌溉布设方式可以显著提高芹菜的维生素 C 含量。这可能是因为微润灌溉能够提供稳定的水分,避免了土壤过干或过湿对芹菜生长的不利影响,有利于维生素 C 在植株体内的合成和积累。香精油是决定蔬菜风味和香气的重要成分^[23]。研究结果显示,T3 处理下的香精油含量最高。这表明通过优化微润灌溉的布设方式,可以显著提高芹菜的香精油含量,增强其风味和香气。这可能是由于微润灌溉能改善土壤水分和养分供应,促进芹菜香精油的合成和积累。

微润灌溉可以根据植物的实际需求,精确控制灌溉水量和频率,使土壤保持适度的湿润程度。这种适宜的湿度条件有利于芹菜根系的生长和发育,促进养分吸收和代谢活动,从而提高芹菜的品质。而漫灌方式往往会导致土壤湿润不均,造成水分不足或过多的问题。

3.1.3 微润灌溉布设方式对芹菜水分利用效率的影响

对微润灌溉水利用效率进行了分析,结果显示,微润灌溉布设方式对水分利用效率的影响有统计学意义,其中 T4 处理的水分利用效率最高,而 T3 处理和 CK 处理的水分利用效率较低。此外,研究发现微润管埋深 20 cm 的处理比埋深 10 cm 的处理具有更高的水分利用效率,这主要是因为 20 cm 埋深处理微润带流量低于 10 cm 埋深处理,其次,20 cm 埋深处理能够更好地减少水分蒸发和流失,提高水分利用效率。但随着微润管铺设密度的增加,水分利用效率有所降低,主要是由于密度增加,灌水量增加,水分利用效率降低。然而,即使在较高铺设密度下,微润灌溉的水分利用效率仍然优于传统的漫灌方式,这进一步证实了微润灌溉技术在农业中的节水优势。

3.1.4 微润灌溉布设方式对芹菜农残的影响

与漫灌相比,微润灌溉显著降低了芹菜百菌清残留量。表明微润灌溉可以有效地减少百菌清在芹菜中的残留量。这可能是因为微润灌溉可以减少水分的浪费,从而减少了百菌清在土壤中的吸附,减少了其在芹菜中的残留。T3 处理下百菌清残留量最低,这可能是由于 T3 处理下的微润灌溉布设方式更加合理和有效,能够更好地控制水分的供应和分布,从而减少了百菌清在芹菜中的残留。CK 处理下百菌清残留量最高,这可能是由于漫灌处理下水分供应不均匀,导致百菌清在芹菜中的分布不均匀,增加了其残留量。

此外,微润灌溉显著降低了芹菜高效氯氰菊酯的残留量,可能是因为微润灌溉可以减少水分的浪费,保持土壤的湿度,从而减少了高效氯氰菊酯在土壤中的吸附,帮助其降解,进而减少了其在芹菜中的残留。

3.2 结论

微润灌溉布设方式对芹菜的长势的影响有统计学意义。特别是 T3 处理, 其在株高、茎粗、叶柄长、宽以及分蘖数等生长指标上表现最优。这表明微润管埋深 10 cm 和较高的铺设密度能够优化芹菜的生长性能。在营养成分和矿物元素含量方面, 微润灌溉显著提高了芹菜的维生素 C、香精油含量, 以及 Ca 和 Mg 的含量。此外, 微润灌溉可降低粗纤维含量, 提升芹菜的口感和食用价值。在水分利用效率方面, T4 处理显示出了最高的水分利用效率。与漫灌相比, 微润灌溉显著降低了百菌清及高效氯氰菊酯的残留量。尽管随着铺设密度的增加, 水分利用效率有所降低, 但微润灌溉仍优于传统的漫灌方式。综合考虑生长性能、营养品质 and 水分利用效率, 本研究发现, T3 处理, 即微润管埋深 10 cm, 采用 3 管 2 行的管道铺设方式, 可实现芹菜生长性能和品质的提升, 同时在一定程度上提高水资源利用效率。

参考文献:

[1] 梁颖, 李艺, 师薇, 等. 芹菜不同品种类型间营养成分及抗氧化活性差异 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 60-63, 92.

[2] 雷雅坤, 刘宁, 郝东旭, 等. 特色果蔬生物活性物质功能及对高血压的保健功效 [J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 412-420.

[3] 龙芳. 3 种提取方式对芹菜可溶性膳食纤维品质特性的影响 [J]. 食品科技, 2021, 46(3): 192-198.

[4] KRANZ S, BRAUCHLA M, CAMPBELL W W, et al. High-Protein and High-Dietary Fiber Breakfasts Result in Equal Feelings of Fullness and Better Diet Quality in Low-Income Preschoolers Compared with Their Usual Breakfast [J]. The Journal of Nutrition, 2017, 147(3): 445-452.

[5] 郭勇, 马娟娟, 郑利剑, 等. 滴灌水分调控对设施芹菜生长与水分利用的影响 [J]. 节水灌溉, 2022(9): 9-16.

[6] ALVINO A, BARBIERI G. Vegetables of Temperate Climates: Leafy Vegetables [J]. Encyclopedia of Food and Health, 2015: 393-400.

[7] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 143-149.

[8] SMITH C J. Food Safety and Health—Past Problems and Future Solutions [J]. Engineering, 2020, 6(4): 384-393.

[9] ZHOU Z F, SHA Y H, SHI Q, et al. Effects of CEO Water Shortage Experience and Power Intensity on Corporate Water Performance - Evidence from China [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 350: 119635.

[10] ZHANG M R, XU Y, WANG J, et al. Impact of Biochar on the Antibiotic Resistome and Associated Microbial Functions in Rhizosphere and Bulk Soil in Water-Saving and Flooding Irrigated Paddy Fields [J]. Environmental Pollution, 2024, 342: 123026.

[11] 杜文勇, 何雄奎, 胡振方, 等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 170-174.

[12] ZHANG M R, XU Y, WANG J, et al. Impact of Biochar on the Antibiotic Resistome and Associated Microbial Functions in Rhizosphere and Bulk Soil in Water-Saving and Flooding Irrigated Paddy Fields [J]. Environmental Pollution, 2024, 342: 123026.

[13] DU Y Q, LIU X F, ZHANG L, et al. Drip Irrigation in Agricultural Saline-Alkali Land Controls Soil Salinity and Improves Crop Yield: Evidence from a Global Meta-Analysis [J]. Science of The Total Environment, 2023, 880: 163226.

[14] 王兰兰, 黄茜, 王会霞, 等. 2022 年湖北省市售蔬菜农药残留分析及风险评估 [J]. 现代预防医学, 2023, 50(18): 3420-3424.

[15] 乔雄梧. 食品中农药残留风险评估述评 [J]. 农药学报, 2023, 25(1): 12-22.

[16] 刘亚冬, 吕陈生, 申鸿, 等. 玉米种衣剂在土壤中的残留动态及对土壤酶活性和可培养细菌的影响 [J]. 西南大学学报

(自然科学版), 2023, 45(6): 76-84.

[17] 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.

[18] 牛文全, 薛万来. 矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 163-172.

[19] 牛文全, 吕望, 古君, 等. 微润管理深与间距对日光温室番茄土壤水盐运移的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 131-140.

[20] 张威, 邵景安, 刘毅, 等. 重庆市不同规模灌区农灌水有效利用系数测算与对比研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 43-52.

[21] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[22] 刘家尧, 刘新. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.

[23] 贾丽丽, 刘惠吉, 王华, 等. 3 种不同芹菜营养品质的比较与评价 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 146-149.

[24] 朱潇, 石林, 何柳青. 粉煤灰提铝渣对土壤养分及芹菜生长与品质的影响 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 98-104.

[25] 张金龙, 刘明, 钱红, 等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 98-103.

[26] 柳检, 罗立强. 芹菜根细胞的超微结构与铅形态特征分析 [J]. 分析化学, 2018, 46(9): 1479-1485.

[27] 王策, 叶津阳, 邢栋, 等. 微润灌多重变水头下土壤水分动态演变与数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 306-318, 368.

[28] 牛文全, 张明智, 许健, 等. 微润管出流特性和流量预报方法研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 217-224, 241.

[29] 武阳, 赵智, 王伟, 等. 调亏灌溉和灌溉方式对香梨树吸收根系重分布的影响 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 244-250, 257.

[30] 李煜铭, 王艳丽, 吴鹏年, 等. 前茬冬小麦不同灌溉处理对夏甘薯产量的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(3): 403-411.

责任编辑 廖坤

