



刘化毫,李莹莹,薛建平,等. 无土栽培切花菊不同生育阶段的基质适宜含水量探究[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):531-540.

Liu H H, Li Y Y, Xue J P, et al. Research on optimal water content for cut chrysanthemum at different growth stages in soilless cultivation[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(3): 531-540.

无土栽培切花菊不同生育阶段的基质适宜含水量探究

刘化毫¹, 李莹莹¹, 薛建平², 赵爽¹, 黄舞武², 陈发棣¹, 陈素梅¹, 张飞¹, 房伟民¹, 管志勇^{1*}

(1.南京农业大学园艺学院/作物遗传与种质创新利用全国重点实验室/农业农村部景观农业
重点实验室,江苏 南京 211800;2.开远天华生物产业有限公司,云南 开远 661600)

摘要:[目的]本文旨在明确切花菊各生育期最优的基质适宜水分含量,为切花菊的水分精确管理提供科学依据。[方法]以多头切花菊主栽品种‘南农小金星’和‘瑞多斯特白’为基质栽培试验材料,在营养生长期、花芽分化期和花蕾膨大期3个时期设置基质水分含量4种区间试验处理(分别为基质田间持水量的10%~25%、25%~40%、40%~55%和55%~70%),除处理之外的生根期水分供应确保充足,比较基质不同水分含量对切花菊生长、切花品质 and 水分利用率的影响。[结果]切花菊各生育阶段对基质水分需求不同:在营养生长期,当基质含水量维持在田间持水量的40%~55%时,切花菊达到最佳生长状态;进入花芽分化期后,适宜水分范围扩展为40%~55%和55%~70%2个区间;至花蕾膨大期,切花菊对水分的适应性进一步增强,在25%~40%、40%~55%及55%~70%3个含水区间均能保持良好生长态势。进一步分析发现,在试验的各生育阶段中,切花菊的水分利用率随着基质相对含水量的降低,水分利用率显著提高。在确保植株正常生长发育的前提下,将基质含水量降低至各生育期适宜范围的下限附近,可显著提高水分利用率。[结论]综合切花菊各生育期的阶段生长状况、鲜花品质指标和水分利用率,基质栽培条件下的各生育期灌溉阈值建议:营养生长期维持基质含水量于田间持水量的40%~55%,花芽分化期保持在40%~55%含水量,而花蕾膨大期则调整至25%~40%,对应的最佳单位面积灌水量为营养生长期 $33.93\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 、花芽分化期 $54.73\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 、花蕾膨大期 $84.85\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

关键词:切花菊;基质栽培;滴灌;节水;水分利用率

中图分类号:S682.11

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)03-0531-10

Research on optimal water content for cut chrysanthemum at different growth stages in soilless cultivation

LIU Huahao¹, LI Yingying¹, XUE Jianping², ZHAO Shuang¹, HUANG Wuwu², CHEN Fadi¹,
CHEN Sumei¹, ZHANG Fei¹, FANG Weimin¹, GUAN Zhiyong^{1*}

(1.College of Horticulture/Key Laboratory of Crop Genetics & Germplasm Enhancement and Utilization/Key Laboratory of
Landscaping, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China;
2.Kaiyuan Tianhua Biological Industry Co., Ltd., Kaiyuan 661600, China)

Abstract:[Objectives] This study aimed to determine the optimal substrate moisture content for each growth stage of cut chrysanthemums, providing a scientific basis for precise water management. [Methods] Using the main multi-head cut chrysanthemum cultivars ‘Nannongxiaojinxing’ and ‘Ridost White’ as substrate cultivation materials, four experimental treatments were set with different substrate moisture content intervals (10%–25%, 25%–40%, 40%–55%, and 55%–70% of the substrate field capacity, respectively) during the vegetative growth stage, floral bud differentiation stage, and flower bud enlargement stage. Adequate water supply was ensured during the rooting stage outside of these treatments. The effects of different substrate moisture contents on the growth, cut flower quality, and water use efficiency of cut chrysanthemums were compared. [Results] The water requirement of cut chrysanthemums varied across different growth stages. During the vegetative growth stage, the optimal growth state was achieved when the substrate moisture content was maintained at 40%–55% of field capacity. After entering the floral bud differentiation stage, the suitable moisture range expanded to two intervals: 40%–55% and 55%–70%. By the flower bud enlargement stage, the adaptability of cut chrysanthemums to water further increased, allowing good growth within three moisture ranges: 25%–40%, 40%–55% and 55%–70%. Further analysis showed that, across all growth stages, water use efficiency significantly improved as the relative substrate moisture content decreased. Under the premise of ensuring normal plant growth and development, reducing the substrate moisture content to near

收稿日期:2025-01-07

基金项目:国家重点研发计划项目(YFD20201000400);国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23-A18);江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(21)2004]

*通信作者:管志勇,教授,主要从事观赏植物种质资源和遗传育种研究, E-mail: guanzhy@njau.edu.cn。

the lower limit of the suitable range for each growth stage significantly enhanced water use efficiency. [Conclusions] Considering the growth performance at each stage, the cut flower quality indicators at harvest, and water use efficiency, the recommended irrigation thresholds for substrate cultivation were as follows: maintain the substrate moisture content at 40%–55% of field capacity during the vegetative growth stage, keep it at 40%–55% during the floral bud differentiation stage, and adjust it to 25%–40% during the flower bud enlargement stage. The corresponding optimal irrigation volumes per unit area were 33.93 L·m⁻² for the vegetative growth stage, 54.73 L·m⁻² for the floral bud differentiation stage, and 84.85 L·m⁻² for the flower bud enlargement stage.

Keywords: cut chrysanthemums; substrate cultivation; drip irrigation; water conservation; water use efficiency

切花菊是世界四大鲜切花之一,在世界花卉产业中具有重要的地位^[1-2]。我国切花菊生产面积约有 6 800 hm²,年产量约 28 亿枝,产值约 20 亿元,规模位居世界之首。近年来,得益于其丰富的观赏类型、多样的花型与色彩以及较长的货架期,切花菊深受广大消费者的喜爱,种植面积稳中有升。

水分是切花菊的主要构成成分,通常占组织鲜重的 60%~90%,对其生长发育、品质形成及姿态维持至关重要^[3]。因此,精确的水分管理是提高切花菊产量和品质的关键。在切花菊实际生产过程中,水分管理主要通过灌溉时机和灌水量等参数进行调控,常以土壤水势^[4]或田间持水量的百分比^[5-6]作为阈值。研究表明,当土壤水势低于-20 kPa 时,切花菊的光合作用和外观指标会受到抑制^[7]。进一步研究发现,将土壤水势维持在-20~-4 kPa 时,可显著提升其外观品质^[8]。然而,这些研究未充分考虑切花菊不同生育期对水分需求的差异。万书勤等^[9]在番茄研究中指出,不同生育期的最适水分下限不同,开花坐果期为-30 kPa,结果期为-45 kPa。在土壤栽培中以田间持水量的百分比作为水分管理阈值时,番茄、黄瓜等作物的灌溉下限通常为田间持水量的 60%~80%^[6,10-12]。

为克服连作障碍、减少病害并提升切花品质,切花菊生产者逐渐采用无土栽培模式^[13]。常见的栽培方式包括草炭、椰糠和珍珠岩的单一或混合基质栽培。基质栽培在一定程度上缓解了连作障碍问题,但缺乏精确的水分管理依据,导致水资源浪费和切花菊品质不稳定的现象频发。由于基质孔隙度较高,现有设备难以准确测量基质水势,因此通常以田间持水量的百分比作为灌溉指标^[14-15]。此外,基质中水分的有效性较高,其最适灌溉阈值通常低于土壤栽培^[16],因而土壤栽培的水分管理参数无法直接适用于基质栽培。研究表明,番茄、黄瓜等作物在基质栽培条件下的灌溉下限阈值约为田间持水量的 40%~60%^[17-18]。随着切花菊无土栽培模式的推广应用,亟须研发科学合理的基质水分管理方案。

本研究在滴灌水肥一体化设施条件下,通过设置不同生育期的基质水分含量处理试验,结合切花菊的生长指标、切花品质及水分利用率,系统探究基质栽培切花菊各生育期的最优灌溉阈值,旨在为切花菊的水分精确管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验基本情况

试验于 2022 年在云南省开远天华生物产业有限公司温室大棚内开展。该地位于北纬 23°43′,东经 103°27′,海拔 1 300 m,年平均温度 19.8 ℃,年平均降水量约 850 mm,年平均蒸发量约 2 039 mm。试验材料定植于温室大棚内,温室长 16 m,宽 9.6 m,顶高 5.0 m,肩高 4.5 m,南北走向。内设 12 条泡沫基质槽,基质槽内长 14.2 m,宽 0.35 m,深度 0.15 m,每条基质槽纵向铺设 2 条滴灌管。种植基质为草炭、椰糠、珍珠岩混合(体积比 1:1:1),基质容重为 0.11 g·cm⁻³,基质总孔隙度为 77.5%,EC 值为 245.6 μs·cm⁻¹,pH 值为 5.32,田间持水量(基质在充分饱和灌溉后,经过 24~48 h 自然排水能够保持的最大水分含量)为 0.314 m³·m⁻³。

1.2 试验设计

本研究以田间持水量的百分比为灌溉指示指标,分别在切花菊的营养生长期、花芽分化期和花蕾膨大期设置各 4 种区间基质含水量的栽培试验,比较水分梯度处理期间的阶段生长量,以此判断该阶段的合理水量。各生育期划分标准见表 1。根据预试验结果,切花菊生根后,当基质含水量超过田间持水量的 70% 时,会对切花菊的营养器官发育产生显著抑制作用;而当基质含水量维持在 40%~55% 的田间持水量范围内时,切花菊根部和地上部均表现出良好的生长状态,表明该水分区间能够满足其生长需求^[4]。基于此,所有试验处理的基质含水量均控制在田间持水量的 70% 以下。研究共计 12 批水分试验(表 2),每批试验的材料均栽培到切花采收完成。在每批次完整生育期中,除特定试验处理阶段外,其他生根后各时期的基

质水分供应充足,均统一维持在 40%~55%的田间持水量。在生根期,维持较高的基质水分条件能够显著提高插穗的生根率和成活率^[19],因此,在切花菊插穗扦插后,每天充分灌溉 2~3 次,维持基质水分在田间持水量的 60%~80%。每处理 3 个重复,共 36 个试验小区,每小区栽植 100 株,株距、行距均为 10 cm。

表 1 切花菊各生育期的划分标准

Table 1 Classification criteria for each growth stage of cut chrysanthemum	
生育期 Growth stage	定义标准 Defining the standard
生根期 Rooting stage	切花菊插穗扦插至插穗生根成活有 1~2 片新叶长出为生根期 The stage from cutting insertion to the survival of the cutting with 1-2 new leaves emerging
营养生长期 Vegetative growth stage	生根期结束至植株株高约 40 cm 即将进行短日照处理为营养生长期 The stage from the end of the rooting stage until the plant reaches a height of about 40 cm, just before short-day treatment is applied
花芽分化期 Flower bud differentiation stage	营养生长期结束至切花菊显蕾花蕾径 4 mm 为花芽分化期 The stage from the end of the vegetative growth stage until the flower bud becomes visible and reaches a diameter of 4 mm
花蕾膨大期 Flower bud enlargement stage	花芽分化期结束至花朵外轮 1~2 轮花瓣开放为花蕾膨大期 The stage from the end of the flower bud differentiation stage until the outer 1-2 layers of petals begin to open
采花期 Flower picking stage	花蕾膨大期结束后切花菊进入采花期,进行采收 The stage after the flower bud enlargement stage when the cut chrysanthemum enters the harvesting phase
注:1) 本研究采用的生育期划分源自切花菊龙头企业经多年生产实践验证且一直沿用的标准;2) 采花期一般为 3~7 d,时间较短,水分管理同花蕾膨大期。 Note:1) The growth stage division standard adopted in the research is derived from the standard used by the leading enterprise of cut chrysanthemum after years of production practice;2) The flower picking stage is generally 3-7 days, the time is short, the water management flower bud expansion stage.	

表 2 不同生育期切花菊水分处理方案

Table 2 Water treatment scheme of cut chrysanthemum at different growth stages							%
处理 Treatment	营养生长期 Vegetative growth stage		花芽分化期 Flower bud differentiation stage		花蕾膨大期 Flower bud enlargement stage		
	水分下限 Water lower limit	水分上限 Water upper limit	水分下限 Water lower limit	水分上限 Water upper limit	水分下限 Water lower limit	水分上限 Water upper limit	
G1W1	55	70	40	55	40	55	
G1W2	40	55	40	55	40	55	
G1W3	25	40	40	55	40	55	
G1W4	10	25	40	55	40	55	
G2W1	40	55	55	70	40	55	
G2W2	40	55	40	55	40	55	
G2W3	40	55	25	40	40	55	
G2W4	40	55	10	25	40	55	
G3W1	40	55	40	55	55	70	
G3W2	40	55	40	55	40	55	
G3W3	40	55	40	55	25	40	
G3W4	40	55	40	55	10	25	
注:基质含水量为田间持水量的百分比。 Note:The matrix water content was the percentage of field water holding.							

以多头主栽切花菊品种‘南农小金星’和‘瑞多斯特白’作为试验材料。切花菊插穗由开远天华生物产业有限公司提供。插穗规格:‘南农小金星’插穗长度 5~6 cm,真叶 4 片;‘瑞多斯特白’插穗长度 6~7 cm,真叶 5 片。多头切花菊于 2022 年 4 月 21 日采用直插的方式进行扦插种植,定植密度为 100 株·m⁻²。5 月 3 日开始进行水分处理,2022 年 7 月 18 日切花菊采花后结束。栽培过程的花期控制方法:营养生长阶段每日(20:00—02:00)用 200 W 白炽灯补光 6 h,使切花菊处在长日照环境下;当株高达 40 cm 时进行短日照处理,每日(18:00—08:00)打开遮黑膜,使夜长大于 14 h,直至采花结束^[20-21]。

本研究将基质田间持水量的百分比转换为基质体积含水量,采用数据采集器(CR1000X, Campbell Scientific Inc., USA)和时域反射基质体积含水量传感器(CS655, Campbell Scientific Inc., USA)实时监测基质中体积含水量。每日 09:00 和 16:00 各查看一次传感器数据,当基质体积含水量低至该水分处理下限时进行灌溉,灌溉至水分处理的上限。单位面积灌水量的计算公式: $I=(\theta_i-\theta_j)\times0.314\times V\times1\,000$ 。式中: I 为单位面积的灌水量(L·m⁻²); θ_i 为水分处理上限(%); θ_j 为水分处理下限(%);0.314 为表基质水分田间持水率。

间持水量时的体积含水量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); V 为单位面积基质的体积(m^3);1 000用于将单位从立方米(m^3)转换为升(L)。通过比例施肥器和水流量计采用滴灌模式进行水分的精确管理,保持各水分处理的基质体积含水量在其设定的区间。

1.3 数据采集项目及方法

1.3.1 基质水分数据采集 基质水分数据由数据采集器搭载时域反射基质体积含水量传感器进行自动采集,采集频率为每30 s采集1次,存储30 min的平均值。

1.3.2 切花菊生长指标测量 分别于生根期、营养生长期、花芽分化期和花蕾膨大期结束时测量切花菊的株高、茎粗和叶片数指标。每个处理在各小区随机选取9株切花菊,3个重复共27株;基于平均株高,每处理每小区选取5株切花菊,3个重复共15株,进行破坏性取样,测定单株叶面积、植株鲜重和干重。

株高:切花菊种植基质面至生长点的距离,采用卷尺测量株高(cm)。茎粗:植株基部向上30 cm处的直径(植株低于60 cm时,测量株高中部位置的直径),采用游标卡尺测量茎粗(mm)。单株叶片数:单株植株的叶片总数,采用人工计数。单株叶面积:单株植株全部叶片展开摆放置黑色背景布上拍照,采用Image-J软件测量全株叶面积(cm^2)。植株鲜重和干重:植株地上部与地下部分离,地下部用水冲洗干净后擦干,分别测定植株茎、叶、花、地下部鲜重;将称完鲜重的样品置于信封袋中,放入105℃烘箱中杀青30 min,再放入75℃恒温烘箱中烘干至恒重后称其干重(g)。

1.3.3 切花菊花朵指标测量与方法 于切花菊采花期测量花朵数和花蕾茎指标,每个处理在各小区中随机选取9株,3个重复,共测量27株;将符合采花标准的切花菊进行采收^[22-23],并测量单束切花鲜重,每个处理测量9束。花径:单株植株取3朵最大花测定其直径,采用游标卡尺测定花径(mm)。花朵数:单株植株由上部生长点至下部55 cm处全部花朵数,采用人工计数。单束切花鲜重:将切花菊由顶花向下截取75 cm作为切花,去除切花底部茎干20 cm的叶片,10枝花为一束捆扎,并用塑料采花袋进行包装,取电子秤称取单束切花的质量(g)。

1.4 水分利用率计算方法

采用水量平衡法计算切花菊耗水量^[24-25]。本试验采用基质槽栽培,无需考虑地下水补给及深层渗漏情况。计算公式: $ET = I_t + (W_2 - W_1)$ 。式中: ET 为切花菊生育期单位面积耗水量($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$); I_t 为生育期单位面积灌水量($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$); W_1 和 W_2 分别为该生育期初和生育期末的基质贮水量($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$)。

灌溉水利用率和水分利用率^[9]的计算公式: $IWUE = Y/I_t$; $WUE = Y/ET$ 。式中: $IWUE$ 为切花菊灌溉水利用率($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); Y 为切花菊的单位面积生物量的阶段生长量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); WUE 为切花菊水分利用率($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。

1.5 数据统计与分析

采用Excel 2019软件进行数据的统计和处理,采用SPSS 25.0软件对数据进行单因素方差分析和差异显著性检验(Ducann's法, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水分处理对切花菊阶段生长的影响

2.1.1 营养生长期水分处理对切花菊生长的影响 由表3可知,基质含水量显著影响切花菊的营养生长。中水处理(G1W2、G1W3)下,‘南农小金星’和‘瑞多斯特白’的株高均达到最高水平,其中‘南农小金星’在高水处理(G1W1)下的株高较中水处理(G1W2)显著降低12.67% ($P < 0.05$),而‘瑞多斯特白’在高水与中水处理间无显著差异。低水处理(G1W4)下,2个品种的株高均显著低于其他处理。营养生长期的茎粗对低水胁迫敏感,低水处理(G1W4)导致2个品种的茎粗分别下降26.07%和16.32%,显著低于其他处理,但中水与高水处理间无显著差异。叶片生长方面,水分梯度处理下单株叶片数无显著差异,但低水处理(G1W4)显著抑制叶面积增加,2个品种的单株叶面积分别减少30.14%和20.90%。‘南农小金星’的茎、叶鲜重阶段生长量对水分处理较为敏感,G1W2处理的茎、叶鲜重最大,分别为(6.45 ± 0.77)和(21.17 ± 2.74)g,较G1W4处理提高43.41%和43.03%,而‘瑞多斯特白’仅在低水处理下生物量显著降低。2个品种的根鲜重和根干重无显著差异;干重积累趋势与鲜重一致,G1W2处理综合表现最优。综上,G1W3(中低水处理)与G1W4(低水处理)显著抑制生长,而G1W1(高水处理)对‘南农小金星’产生抑制作用。G1W2处理(40%~55%田间持水量)在2个品种的各项指标中均表现出最大生长量,表明40%~55%的田间持水量为切花菊营养生长的最适水分区间。

表3 不同水分处理对切花菊营养生长期阶段生长量的影响

Table 3 Effects of different water treatments on phase growth quantities of cut chrysanthemum at vegetative growth stage

品种 Variety	水分处理 Water treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem thick	单株叶片数 Number of leaves per plant	单株叶面积/cm ² Leaf area per plant	茎鲜重/g Fresh weight of stems	叶鲜重/g Fresh weight of leaves	根鲜重/g Fresh weight of roots	茎干重/g Dry weight of stems	叶干重/g Dry weight of leaves	根干重/g Dry weight of roots
南农小金星 Nannongxiaojinxing	G1W1	30.33±1.26 ^b	2.28±0.23 ^a	12.17±1.23 ^a	221.3±40.15 ^{ab}	5.69±0.56 ^{ab}	16.86±2.07 ^b	1.15±0.39 ^a	0.81±0.18 ^{ab}	1.56±0.56 ^b	0.16±0.07 ^a
	G1W2	34.73±1.45 ^a	2.57±0.25 ^a	13.00±0.75 ^a	283.29±27.51 ^a	6.45±0.77 ^a	21.17±2.74 ^a	1.34±0.40 ^a	1.00±0.13 ^a	1.93±0.22 ^a	0.21±0.05 ^a
	G1W3	31.45±1.84 ^{ab}	2.39±0.19 ^a	11.67±1.15 ^a	239.80±66.67 ^a	5.26±0.54 ^b	15.81±2.24 ^b	1.28±0.35 ^a	0.78±0.06 ^b	1.53±0.27 ^b	0.18±0.05 ^a
	G1W4	25.61±2.22 ^c	1.90±0.28 ^b	11.00±1.75 ^a	197.88±14.26 ^b	3.65±0.42 ^c	12.06±1.52 ^c	1.08±0.22 ^a	0.59±0.08 ^c	1.20±0.14 ^c	0.15±0.04 ^a
瑞多斯特白 Ridost White	G1W1	34.29±1.50 ^a	2.73±0.26 ^a	17.00±0.56 ^a	252.89±50.39 ^{ab}	8.03±1.10 ^a	17.51±1.67 ^{ab}	1.19±0.13 ^a	0.93±0.14 ^a	1.44±0.27 ^{ab}	0.14±0.08 ^a
	G1W2	36.01±1.38 ^a	2.88±0.26 ^a	17.33±0.44 ^a	272.68±22.91 ^a	8.90±0.76 ^a	20.02±1.18 ^a	1.37±0.27 ^a	1.12±0.11 ^a	1.92±0.20 ^a	0.18±0.03 ^a
	G1W3	33.76±1.62 ^a	2.79±0.35 ^a	17.67±0.94 ^a	240.59±30.89 ^{ab}	8.21±1.29 ^a	16.77±1.93 ^b	1.25±0.39 ^a	1.00±0.20 ^a	1.47±0.30 ^{ab}	0.15±0.05 ^a
	G1W4	27.74±2.06 ^b	2.41±0.21 ^b	16.00±1.06 ^a	215.70±21.38 ^b	5.24±0.68 ^b	12.16±1.63 ^c	1.12±0.18 ^a	0.68±0.07 ^b	1.05±0.14 ^b	0.16±0.02 ^a

注:营养生长期生长指标阶段生长量等于各处理营养生长期结束时生长指标测量值减去生根期结束时生长指标的测量值。同品种、同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: The phase growth quantities of growth indicators during the vegetative growth stage equals the measurement values of growth indicators at the end of the vegetative growth stage minus those at the end of the rooting stage for each treatment; for the same variety, different letters following the data in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same as follows.

2.1.2 花芽分化期水分处理对切花菊生长的影响 在花芽分化期, G2W1 (55%~70%) 和 G2W2 (40%~55%) 处理下, 2 个品种的各项生长指标均达到峰值, 且 2 个处理间无显著差异。当含水量降至 G2W3 (25%~40%) 处理时, ‘南农小金星’ 的株高和茎粗分别下降 13.10% 和 36.26%, 而 ‘瑞多斯特白’ 仅在水分低至 G2W4 (10%~25%) 处理时, 株高和茎粗才显著降低。花芽分化期的单株叶片数和叶面积对水分变化不敏感, G2W1、G2W2 和 G2W3 处理的株高和茎粗无显著差异, 但在 G2W4 处理下, 2 个品种的单株叶片数和叶面积显著降低。切花菊不同器官对水分的需求特性存在差异: 叶鲜重对水分胁迫更为敏感, 2 个品种在 G2W3 处理即出现显著下降, 而茎鲜重仅在 G2W4 处理显著下降。花芽分化期的根鲜重和根干重对水分不敏感, 各水分处理间无显著差异。G2W1、G2W2 和 G2W3 处理的茎、叶干重无显著差异, 当水分低至 G2W4 处理时, 切花菊的茎、叶干重显著降低。综上, 切花菊花芽分化期各生长指标达到最佳状态的水分区间为 40%~55% 和 55%~70%。

表4 不同水分处理对切花菊花芽分化期阶段生长量的影响

Table 4 Effects of different water treatments on phase growth quantities of cut chrysanthemum at flower bud differentiation stage

品种 Variety	水分处理 Water treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem thick	单株叶片数 Number of leaves per plant	单株叶面积/cm ² Leaf area per plant	茎鲜重/g Fresh weight of stems	叶鲜重/g Fresh weight of leaves	根鲜重/g Fresh weight of roots	茎干重/g Dry weight of stems	叶干重/g Dry weight of leaves	根干重/g Dry weight of roots
南农小金星 Nannongxiaojinxing	G2W1	36.93±1.60 ^{ab}	0.91±0.37 ^a	8.33±1.90 ^a	804.27±109.33 ^a	8.68±2.07 ^a	15.07±2.47 ^a	1.89±0.9 ^a	1.79±0.32 ^{ab}	1.17±0.19 ^{ab}	0.34±0.14 ^a
	G2W2	39.17±2.85 ^a	0.77±0.17 ^a	7.33±0.77 ^a	804.64±90.71 ^a	9.31±1.22 ^a	15.29±2.58 ^a	1.94±0.34 ^a	2.09±0.25 ^a	1.30±0.21 ^a	0.35±0.06 ^a
	G2W3	34.04±1.88 ^b	0.58±0.29 ^b	6.00±1.33 ^a	692.88±69.09 ^a	7.59±1.82 ^{ab}	11.90±1.88 ^b	1.77±0.98 ^a	1.68±0.20 ^b	1.03±0.17 ^{ab}	0.32±0.15 ^a
	G2W4	31.56±2.41 ^c	0.42±0.24 ^c	3.00±1.00 ^b	587.45±64.02 ^b	6.69±1.77 ^b	10.88±1.27 ^b	1.88±0.71 ^a	1.65±0.12 ^b	0.93±0.11 ^b	0.32±0.13 ^a
瑞多斯特白 Ridost White	G2W1	54.02±1.36 ^a	1.29±0.21 ^a	12.00±0.77 ^a	822.95±43.59 ^a	20.58±2.31 ^a	27.33±4.55 ^a	2.92±0.76 ^a	3.29±0.44 ^a	2.13±0.44 ^{ab}	0.44±0.13 ^a
	G2W2	52.84±0.88 ^{ab}	1.21±0.23 ^a	11.66±1.04 ^a	754.44±96.04 ^a	19.94±2.01 ^a	26.22±6.17 ^a	2.34±0.54 ^a	3.22±0.49 ^a	2.44±0.33 ^a	0.37±0.09 ^a
	G2W3	50.22±1.49 ^b	1.17±0.27 ^a	13.66±1.04 ^a	844.95±45.91 ^a	19.15±1.44 ^a	20.63±2.37 ^b	2.72±0.38 ^a	3.11±0.24 ^a	1.69±0.21 ^b	0.43±0.06 ^a
	G2W4	40.24±2.20 ^c	0.55±0.19 ^b	5.66±1.26 ^b	432.32±120.08 ^b	9.83±1.77 ^b	9.97±3.92 ^c	1.69±0.35 ^b	1.89±0.48 ^b	0.94±0.38 ^c	0.31±0.05 ^a

注:花芽分化期生长指标阶段生长量等于各处理花芽分化期结束时生长指标测量值减去营养生长期结束时生长指标的测量值。

Note: The phase growth quantities of growth indicators during the flower bud differentiation stage equal the measurement values of growth indicators at the end of the flower bud differentiation stage minus those at the end of the vegetative growth stage for each treatment.

2.2 花蕾膨大期水分处理对切花菊生长的影响 如表5所示, 切花菊花蕾膨大期的水分最适区间范围较广。‘南农小金星’ 的各生长指标在 G3W1、G3W2 和 G3W3 处理间无显著差异; 当水分降至 G3W4 处理水平时, 除茎粗外, 其他指标的生长量均显著降低, 但各水分处理下 ‘南农小金星’ 的茎粗生长量无显著差异。‘瑞多斯特白’ 的株高和根鲜重在 G3W3 处理下显著下降, 但其他指标在 G3W1、G3W2 和 G3W3 处理间无显著差异; G3W4 处理的株高、茎粗和叶面积显著下降。值得注意的是, ‘瑞多斯特白’ 在 G3W3 处理下, 虽然株高 (21.97 cm) 显著低于高水处理, 但其株高总量已达到 (104.95±5.39) cm, 超过采花要求的最低标准 (>75 cm)。此外, 花蕾膨大期的根鲜重对切花菊后期品质的影响较低。综合以上分析, 花蕾膨大期的最适水分区间为 25%~40%、40%~55% 和 55%~70%。

表 5 不同水分处理对切花菊花蕾膨大期阶段生长量的影响

Table 5 Effects of different water treatments on phase growth quantities of cut chrysanthemum at flower bud enlargement stage

品种 Variety	水分处理 Water treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem thick	单株叶片数 Number of leaves per plant	单株叶面积/cm ² Leaf area per plant	茎鲜重/g Fresh weight of stems	叶鲜重/g Fresh weight of leaves	根鲜重/g Fresh weight of roots	茎干重/g Dry weight of stems	叶干重/g Dry weight of leaves	根干重/g Dry weight of roots
南农小金星 Nannongxiaojinxing	G3W1	28.04±2.13 ^a	0.50±0.38 ^a	8.00±1.00 ^a	256.80±44.53 ^a	4.95±1.73 ^{ab}	4.35±1.20 ^{ab}	0.62±0.23 ^a	1.68±0.27 ^{ab}	0.57±0.25 ^{ab}	0.13±0.07 ^{ab}
	G3W2	26.11±2.16 ^a	0.24±0.19 ^a	6.67±0.29 ^{ab}	269.17±16.11 ^a	7.28±1.43 ^a	6.88±1.55 ^a	0.82±0.13 ^a	2.41±0.35 ^a	1.08±0.42 ^a	0.21±0.05 ^a
	G3W3	25.21±1.87 ^a	0.48±0.24 ^a	6.00±1.54 ^{ab}	129.75±68.33 ^a	6.41±1.52 ^a	5.60±0.97 ^a	0.58±0.18 ^{ab}	2.18±0.46 ^a	0.73±0.17 ^a	0.11±0.08 ^{ab}
	G3W4	19.32±2.46 ^b	0.33±0.23 ^a	4.00±1.73 ^b	89.92±17.87 ^b	3.42±0.92 ^b	3.18±0.80 ^b	0.32±0.13 ^b	1.30±0.18 ^b	0.35±0.16 ^b	0.06±0.04 ^b
瑞多斯特白 Ridost White	G3W1	29.37±2.42 ^a	0.45±0.21 ^{ab}	6.00±1.16 ^a	163.24±32.20 ^a	8.11±2.31 ^a	9.08±2.53 ^a	0.78±0.24 ^a	3.11±0.58 ^a	0.90±0.14 ^a	0.36±0.06 ^a
	G3W2	26.98±2.05 ^a	0.39±0.25 ^{ab}	6.67±2.60 ^a	140.34±44.68 ^a	7.91±2.58 ^a	9.44±1.87 ^a	0.68±0.18 ^a	2.72±0.86 ^a	0.81±0.16 ^a	0.32±0.07 ^a
	G3W3	21.97±1.78 ^b	0.61±0.15 ^a	4.67±1.42 ^a	123.90±33.36 ^{ab}	8.20±1.29 ^a	8.15±1.59 ^a	0.37±0.23 ^b	2.80±0.73 ^a	0.87±0.23 ^a	0.29±0.07 ^a
	G3W4	15.44±1.17 ^c	0.19±0.20 ^b	3.00±1.76 ^a	71.39±26.43 ^b	3.42±2.39 ^b	6.09±2.10 ^a	0.22±0.43 ^b	1.30±0.52 ^b	0.65±0.18 ^a	0.25±0.09 ^a

注:花蕾膨大期生长指标阶段生长量等于各处理花蕾膨大期结束时生长指标测量值减去花芽分化期结束时生长指标的测量值。
Note: The phase growth quantities of growth indicators during the flower bud enlargement stage equal the measurement values of growth indicators at the end of the flower bud enlargement stage minus those at the end of the flower bud differentiation stage for each treatment.

2.3 不同生育期阶段水分处理对切花菊品质的影响

切花菊的花径、花朵数和单束切花鲜重是切花分级的重要品质指标。由表 6 可见,在营养生长期,‘南农小金星’G1W4 处理花朵数和单束切花鲜重显著低于其他处理,而 G1W1、G1W2 和 G1W3 处理的切花品质指标无显著差异;‘瑞多斯特白’仅在 G1W4 处理时花径显著降低,其他指标在各处理间保持稳定。在花芽分化期,‘南农小金星’的切花品质指标在各处理下无显著差异,而 G2W4 处理显著降低了‘瑞多斯特白’的花径和花朵数。至花蕾膨大期,G3W4 处理显著降低了‘南农小金星’的花径和单束切花鲜重,并且‘瑞多斯特白’的花径、花朵数、单束切花鲜重以及花鲜、干重也显著下降。除花蕾膨大期的 G3W4(低水)处理在采花时花群体开放整齐度略差,采花期延迟外,其他各处理的花期开放度和采花期无明显差异。综上,花蕾膨大期在基质水分不低于田间持水量的 25%时,切花菊的品质指标不受显著影响。

表 6 不同生育期阶段水分处理对切花部分品质指标的影响

Table 6 Effects of water treatments during different growth stages on some quality indexes of the cut flower

品种 Variety	水分处理 Water treatment	花径/mm Flower diameter	花朵数 Number of flowers	单束切花鲜重/g Fresh weight of single bundle cut flowers	花鲜重/g Fresh weight of flowers	花干重/g Dry weight of flowers
南农小金星 Nannongxiaojinxing	G1W1	10.31±2.34 ^a	15.00±2.94 ^a	510.44±38.13 ^{ab}	4.15±3.91 ^a	0.60±0.54 ^a
	G1W2	9.65±1.11 ^a	15.33±1.57 ^a	543.50±23.41 ^a	3.96±3.10 ^a	0.57±0.44 ^a
	G1W3	9.72±1.02 ^a	13.44±2.00 ^{ab}	520.75±34.71 ^a	3.18±1.31 ^a	0.41±0.17 ^a
	G1W4	8.42±0.86 ^a	11.89±1.37 ^b	446.59±40.15 ^b	3.29±0.38 ^a	0.46±0.05 ^a
	G2W1	11.99±3.40 ^a	13.78±2.44 ^a	496.26±46.80 ^a	3.62±2.00 ^a	0.53±0.31 ^a
	G2W2	11.2±1.97 ^a	13.78±1.96 ^a	516.86±26.06 ^a	4.16±2.17 ^a	0.59±0.32 ^a
	G2W3	12.92±3.94 ^a	16.00±2.24 ^a	481.13±31.35 ^a	4.10±2.65 ^a	0.56±0.35 ^a
	G2W4	12.92±3.20 ^a	14.22±1.49 ^a	504.51±47.57 ^a	3.07±1.70 ^a	0.43±0.24 ^a
	G3W1	10.58±2.64 ^{ab}	17.22±3.70 ^a	514.55±53.89 ^{ab}	3.25±2.26 ^{ab}	0.45±0.21 ^a
	G3W2	11.27±1.28 ^a	15.11±3.18 ^a	500.25±36.52 ^{ab}	3.99±1.44 ^a	0.58±0.22 ^a
	G3W3	10.20±2.08 ^{ab}	16.13±2.85 ^a	542.83±28.36 ^a	2.64±1.96 ^{ab}	0.44±0.17 ^a
	G3W4	8.14±0.82 ^b	16.44±1.59 ^a	444.57±38.90 ^b	1.40±0.51 ^b	0.26±0.12 ^a
瑞多斯特白 Ridost White	G1W1	15.86±2.57 ^a	30.63±4.06 ^a	671.83±48.42 ^a	13.32±2.84 ^a	1.87±0.34 ^a
	G1W2	14.93±1.61 ^a	28.75±3.20 ^{ab}	693.58±37.26 ^a	12.37±2.44 ^a	1.71±0.28 ^a
	G1W3	15.90±2.14 ^a	23.88±2.48 ^b	709.25±31.47 ^a	13.00±1.59 ^a	1.77±0.65 ^a
	G1W4	14.57±1.24 ^a	22.75±3.25 ^b	658.66±25.14 ^a	14.95±2.53 ^a	2.09±0.94 ^a
	G2W1	15.94±0.92 ^{ab}	29.38±4.07 ^a	651.26±31.61 ^a	9.74±3.33 ^b	1.31±0.50 ^a
	G2W2	14.85±1.75 ^{ab}	32.88±5.22 ^a	704.95±43.01 ^a	14.07±3.79 ^a	1.79±0.49 ^a
	G2W3	18.20±2.23 ^a	25.25±3.41 ^{ab}	711.00±34.56 ^a	11.86±3.50 ^{ab}	1.53±0.44 ^a
	G2W4	14.75±1.14 ^b	20.88±3.69 ^b	691.45±20.92 ^a	11.54±2.95 ^{ab}	1.43±0.38 ^a
	G3W1	15.00±0.97 ^a	30.75±4.70 ^a	679.55±32.33 ^{ab}	15.22±2.26 ^a	2.07±0.29 ^a
	G3W2	15.54±2.04 ^a	28.00±3.01 ^a	730.98±53.30 ^a	12.48±3.38 ^a	1.63±0.42 ^a
	G3W3	14.71±2.09 ^a	24.71±3.73 ^{ab}	671.87±24.49 ^{ab}	12.92±2.74 ^a	1.81±0.44 ^a
	G3W4	10.14±1.16 ^b	20.38±2.84 ^b	605.88±27.00 ^b	5.52±2.19 ^b	0.99±0.38 ^b

2.4 不同生育期水分处理对切花菊水分利用率的影响

2.4.1 不同水分处理对各生育期的单位面积灌水量和耗水量的影响 由表 7 可知,切花菊各生育期的单位面积灌水量和耗水量均随基质水分含量增加呈显著递增趋势,由大到小依次为花蕾膨大期、花芽分化期、营养生长期,且各生育阶段间差异显著。单位面积灌水量与耗水量的关系在处理间表现不同:高水处理(W1 和 W2)下的单位面积耗水量低于单位面积灌水量,单位面积耗水量约占灌水量的 91%~98%,而低水处理(W3 和 W4)下的单位面积耗水量高于单位面积灌水量,单位面积耗水量约占灌水量的 112%~127%。这种差异源于高水处理因滴灌精准供水形成 2.68~4.36 L·m⁻² 基质储水,而低水处理通过吸收前阶段存储水实现水分补偿。

表 7 不同水分处理下切花菊各生育期单位面积的灌水量和耗水量

Table 7 Statistics of irrigation and water consumption of per unit area during different growth stages of cut chrysanthemum under different water treatments								
水分处理 Treatment	各生育期单位面积的灌水量 Irrigation amount per unit area during each growth stage			全生育期单位面积总灌水量 Total irrigation amount per unit area during the whole growth stages	各生育期单位面积的耗水量 Water consumption per unit area during each growth stage			全生育期单位面积总耗水量 Total water consumption per unit area during the whole growth stages
	营养生长期 Vegetative growth stage	花芽分化期 Flower bud differentiation stage	花蕾膨大期 Flower bud enlargement stage		营养生长期 Vegetative growth stage	花芽分化期 Flower bud differentiation stage	花蕾膨大期 Flower bud enlargement stage	
G1W1	51.93	54.73	84.85	191.51	47.57	53.69	82.84	184.10
G1W2	33.93	54.73	84.85	173.51	31.25	53.69	82.84	167.78
G1W3	20.70	54.73	84.85	160.28	23.21	53.69	82.84	159.74
G1W4	13.97	54.73	84.85	153.55	17.38	53.69	82.84	153.91
G2W1	33.93	78.49	84.85	197.27	31.25	75.16	82.84	189.25
G2W2	33.93	54.73	84.85	173.51	31.25	53.69	82.84	167.78
G2W3	33.93	39.43	84.85	158.21	31.25	41.45	82.84	155.54
G2W4	33.93	29.50	84.85	148.28	31.25	34.26	82.84	148.35
G3W1	33.93	54.73	115.72	204.38	31.25	53.69	110.69	195.63
G3W2	33.93	54.73	84.85	173.51	31.25	53.69	82.84	167.78
G3W3	33.93	54.73	62.52	151.18	31.25	53.69	65.73	150.67
G3W4	33.93	54.73	38.35	127.01	31.25	53.69	43.94	128.88

2.4.2 不同水分处理对各生育期的水分利用率的影响 切花菊的水分利用率在生育期间及品种间均存在显著差异(图 1)。在营养生长期,2 个品种的灌溉水利用率均随基质含水量降低而显著提高,其中

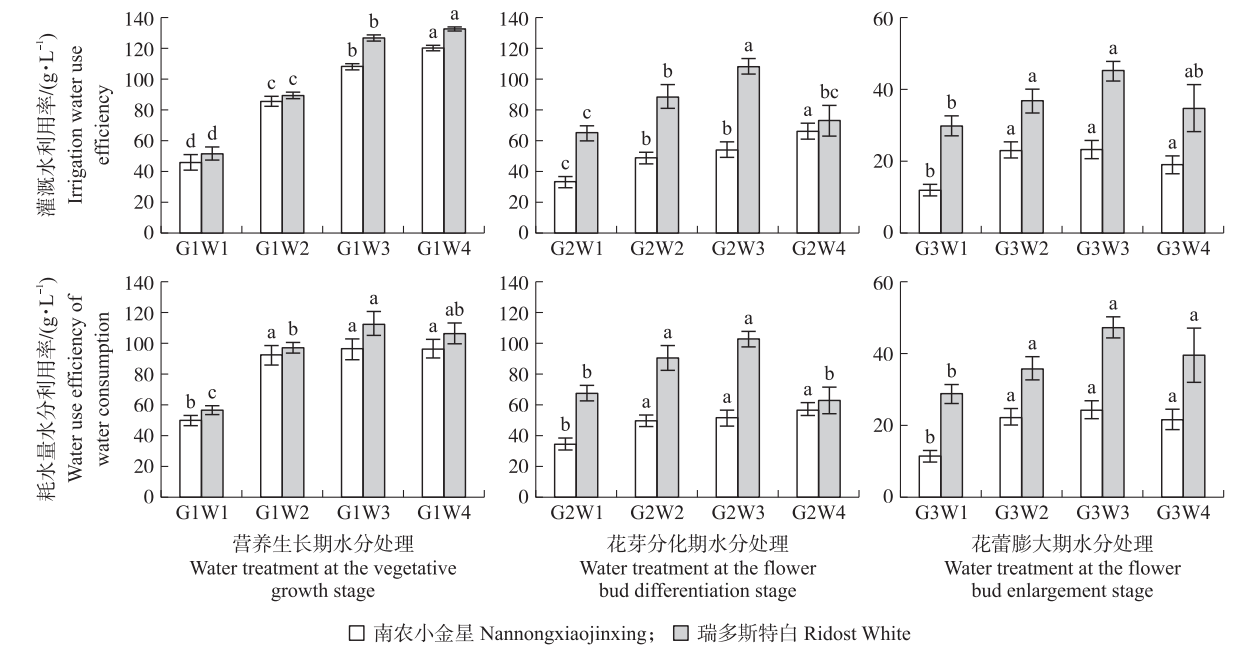


图 1 不同水分处理下各生育期的水分利用率

Fig. 1 Water use efficiency during different growth stages under various water treatments

同品种、同生育期的柱形图上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters on the bar charts for the same variety and the same growth stage indicate significant differences ($P<0.05$).

G1W4 处理‘南农小金星’的灌溉水利用率最大值为 $110 \sim 120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ‘瑞多斯特白’则为 $130 \sim 140 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 且‘瑞多斯特白’在各水分处理下的灌溉水利用率均高于‘南农小金星’。在花芽分化期, ‘南农小金星’的灌溉水利用率随基质含水量降低而显著提高, 而‘瑞多斯特白’的灌溉水利用率则先升后降, 除 G2W4 处理外, ‘瑞多斯特白’的灌溉水利用率显著高于‘南农小金星’。至花蕾膨大期, 2 个品种的灌溉水利用率较前 2 个阶段下降 $32\% \sim 45\%$, 且在中低水处理 (G3W2、G3W3、G3W4) 间无显著差异, 而高水处理 (G3W1) 的灌溉水利用率显著低于其他处理。‘瑞多斯特白’在各处理中均保持利用率优势, 较‘南农小金星’高 $19\% \sim 28\%$ 。此外, ‘南农小金星’在 3 个生育期的 W2—W4 处理下, 耗水量水分利用率无显著差异, 而高水 (W1) 处理的耗水量水分利用率显著低于其他处理; ‘瑞多斯特白’在营养生长期和花蕾膨大期的 W2—W4 处理下, 耗水量水分利用率无显著差异, 但在花芽分化期, W4 处理的耗水量水分利用率低于 W2 和 W3 处理, 且各时期的 W1 处理均显著低于其他处理。营养生长期, ‘南农小金星’的耗水量水分利用率最大值为 $90 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, ‘瑞多斯特白’则为 $100 \sim 110 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 花芽分化期, 2 个品种的耗水量水分利用率最大分别分别为 $40 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $90 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 花蕾膨大期则分别为 $20 \sim 25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。综上, ‘瑞多斯特白’的灌溉水利用率与耗水量水分利用率均高于‘南农小金星’。

3 讨论与结论

水肥一体化滴灌技术因其节水节肥优势已成为切花菊栽培中的主流水肥管理模式^[22,26], 为提高资源利用效率, 当前生产中普遍采用少量多次的高频灌溉施肥方案^[27], 这对水肥管理技术的精准度提出了更高要求。本研究通过系统分析不同生育期基质水分含量对切花菊生长的影响, 建立了分阶段差异化的水分灌溉参考标准, 为基质栽培体系下的水肥调控提供了科学依据。

本研究中, 在营养生长期, $40\% \sim 55\%$ 的基质含水量为最适阈值区间。该条件下植株的株高、茎粗、叶片数和生物量等生长指标均达到最佳水平, 当基质含水量低于 40% 以及高于 55% 时, 切花菊的生长均受到抑制。营养生长期切花菊根系尚未充分发育, 对基质水分较为敏感^[5,28], 过低的灌水下限导致基质水分亏缺^[29], 从而抑制切花菊的生长, 而基质含水量过高会阻碍根系呼吸^[18], 同时降低基质中养分离子的浓度, 进一步限制切花菊的正常生长。

本研究表明, 在花芽分化期, 切花菊在 $40\% \sim 55\%$ 和 $55\% \sim 70\%$ 的基质含水量条件下均能维持良好生长状态, 这与在番茄、黄瓜等作物上的研究结论^[5,12,16-17]一致。作为衡量水分转化效率的核心指标, 水分利用率在设施栽培中直接反映灌溉水的生产力转化水平, 其提升是节水农业的重要目标^[24-25]。本研究发现, $40\% \sim 55\%$ 含水量处理的灌溉水利用率与耗水量水分利用率均显著高于 $55\% \sim 70\%$ 处理。适度水分调控可通过减少无效蒸腾和降低深层渗漏来提升水分利用效率^[24]。因此, 将基质含水量控制在 $40\% \sim 55\%$, 既可满足切花菊生长需求, 又能实现水资源高效利用。此外, 温室环境因子 (如温度、光照强度等) 通过影响蒸腾作用, 显著影响切花菊单位面积的灌水量和耗水量^[30-31], 进而影响其水分利用率。后续研究需明确温度、光照强度和湿度等环境因素对切花菊水分利用率的影响, 以进一步优化精确灌溉策略。

本研究中, 在花蕾膨大期, $25\% \sim 40\%$ 、 $40\% \sim 55\%$ 和 $55\% \sim 70\%$ 这 3 个基质含水量处理对切花菊的花径、花朵数及单束切花鲜重等关键品质指标均无显著影响。但 $25\% \sim 40\%$ 处理下 2 个品种的水分利用率均显著高于其他 2 个处理。尽管该处理导致切花菊遭受轻微水分胁迫, 株高受到一定抑制, 但未对切花品质产生负面效应。此外, 研究表明适度水分胁迫可延长瓶插寿命^[3]。因此, $25\% \sim 40\%$ 基质含水量是该时期的最优水分管理区间, 能够兼顾产量、品质与资源效率的平衡。本研究中, ‘南农小金星’和‘瑞多斯特白’2 个品种对水分响应存在差异, 说明品种间对水分需求的遗传差异, 下一步需针对更多切花菊主栽品种开展水分需求的栽培试验, 以获得水分管理关键技术参数, 为精确的灌溉管理决策提供依据。

综上, 本研究通过系统解析切花菊不同生育期的水分响应规律, 结合其各生育期的生长状况、鲜花采收品质指标及水分利用率, 提出了基质栽培切花菊的优化灌溉方案: 营养生长期维持基质含水量为 $40\% \sim 55\%$ 田间持水量, 花芽分化期保持在 $40\% \sim 55\%$ 田间持水量, 花蕾膨大期则采用 $25\% \sim 40\%$ 田间持水量的控水标准。该方案在确保切花品质的同时, 显著提高了资源利用效率, 为实现节水节肥的可持续生产提供了科学依据。

参考文献 References:

- [1] Teixeira da Silva J A, Shinoyama H, Aida R, et al. Chrysanthemum biotechnology: Quo vadis? [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2013,

- 32(1):21-52.
- [2] 葛礼姣,方馨妍,张云月,等. 菊花苗期氮高效品种资源筛选及氮效率评价体系建立[J]. 南京农业大学学报,2021,44(6):1054-1062. DOI:10.7685/jnau.202012017.
Ge L J, Fang X Y, Zhang Y Y, et al. Screening of nitrogen efficient varieties and its assessment system construction at seedling stage of chrysanthemum[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(6):1054-1062(in Chinese with English abstract).
- [3] 田沛,江晓东,邹纯丽,等. 亏缺灌溉对切花菊‘神马’采后品质的影响[J]. 中国农业气象,2024,45(10):1174-1182.
Tian P, Jiang X D, Zou C L, et al. Effect of deficit irrigation on post-harvest quality of cut chrysanthemum ‘Shenma’[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(10):1174-1182(in Chinese with English abstract).
- [4] 周艳宝,戴剑锋,林球,等. 水分对日光温室独本菊外观品质影响的模拟[J]. 农业工程学报,2009,25(6):204-209.
Zhou Y B, Dai J F, Lin L, et al. Simulation of effect of water on external quality of standard cut chrysanthemum in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6):204-209(in Chinese with English abstract).
- [5] 王聪聪,孙磊,郭凤台,等. 土壤水分状况对温室滴灌番茄水分利用效率及果实品质的影响[J]. 灌溉排水学报,2011,30(2):86-89.
Wang C C, Sun L, Guo F T, et al. Response of tomato yield, quality, and water use efficiency to soil water status under drip irrigation in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2):86-89(in Chinese with English abstract).
- [6] 陈秀香,马富裕,方志刚,等. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. 节水灌溉,2006(4):1-4.
Chen X X, Ma F Y, Fang Z G, et al. Preliminary study on the influence of soil moisture on yield and quality of processed tomato[J]. Water Saving Irrigation, 2006(4):1-4(in Chinese with English abstract).
- [7] 周艳宝,戴剑锋,林球,等. 水分对日光温室独本菊生长动态影响的模拟[J]. 农业工程学报,2008,24(11):176-182.
Zhou Y B, Dai J F, Lin L, et al. Quantifying the effects of water on growth dynamics of standard cut chrysanthemum in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11):176-182(in Chinese with English abstract).
- [8] Lin L, Li W W, Shao J Q, et al. Modelling the effects of soil water potential on growth and quality of cut chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*) [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1):275-288.
- [9] 万书勤,闫振坤,康跃虎,等. 温室滴灌土壤基质势调控对番茄生长、品质和耗水的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(7):1-9.
Wan S Q, Yan Z K, Kang Y H, et al. Response in growth, quality and water consumption of greenhouse tomato to change in matric potential at 20 cm below the emitter of drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7):1-9(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈晓林,陈星宏,马梦雨,等. 不同水分处理对甘平果实裂果及相关生理特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2024,46(6):74-87.
Chen X L, Chen X H, Ma M Y, et al. Effect of different water treatments on fruit cracking and related physiological characteristics of Kanpei fruit [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(6):74-87(in Chinese with English abstract).
- [11] 全国栋,刘洪禄,吴文勇,等. 不同水分处理对茄子生长与产量品质的影响[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(6):540-545.
Tong G D, Liu H L, Wu W Y, et al. Effects of different water treatments on growth, yield and quality of greenhouse eggplant[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6):540-545(in Chinese with English abstract).
- [12] 廖凯,范兴科. 黄瓜不同生长期水分效应及水分生产函数研究[J]. 节水灌溉,2011(6):10-13.
Liao K, Fan X K. Research on water effect at different growth stages and water production function of cucumber[J]. Water Saving Irrigation, 2011(6):10-13(in Chinese with English abstract).
- [13] 张涛,李悦. 不同栽培基质对切花菊生长发育的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2006,20(2):93-95.
Zhang T, Li Y. Effects of different stromas on the growth and development of *Dendranthema morifolium* [J]. Journal of Shandong University of Technology (Science and Technology), 2006, 20(2):93-95(in Chinese with English abstract).
- [14] 岳焕芳,李友丽,安鑫语,等. 基于水分传感器的灌溉决策对基质栽培草莓生长、产量与品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(11):39-49.
Yue H F, Li Y L, An X Y, et al. The impact of irrigation decisions based on moisture sensor on the growth, yield and quality of strawberries cultivated in substrate[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(11):39-49(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘俏润,朱志梅,樊军. 三种土壤水势传感器在原状与扰动黏壤土上测定精度评价[J]. 土壤通报,2019,50(6):1315-1322.
Liu Q R, Zhu Z M, Fan J. Measuring accuracy evaluation of three kinds of water potential sensors for undisturbed and disturbed clay loam[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6):1315-1322(in Chinese with English abstract).
- [16] 刘晓奇,肖雪梅,王俊文,等. 水分亏缺对日光温室基质栽培番茄果实营养和风味品质的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(2):443-453.
Liu X Q, Xiao X M, Wang J W, et al. Effects of water deficit on nutrition and flavor qualities of tomato fruits cultivated by substrate in solar greenhouse[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(2):443-453(in Chinese with English abstract).
- [17] 岳焕芳,李超,安顺伟,等. 基于基质水分的多因素樱桃番茄灌溉决策研究[J]. 农学学报,2023,13(2):43-49.
Yue H F, Li C, An S W, et al. Multi-factor irrigation scheme of cherry tomato based on substrate moisture[J]. Journal of Agriculture, 2023, 13(2):43-49(in Chinese with English abstract).
- [18] 夏海波,于晓蕾,黄乾,等. 不同水分处理对无土栽培黄瓜叶绿素荧光参数的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(增刊2):90-94.
Xia H B, Yu X L, Huang Q, et al. Effects of different water treatments on chlorophyll fluorescence parameters of soilless cucumber[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(Suppl 2):90-94(in Chinese with English abstract).
- [19] 黄熊娟,李剑钊. 菊花扦插生根研究进展[J]. 广西农业科学,2008,39(5):668-671.

- Huang X J, Li J Z. Research advance in rooting of chrysanthemum cuttings [J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2008, 39 (5): 668–671 (in Chinese with English abstract).
- [20] Lee J H, Heuvelink E. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut chrysanthemum [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91 (3): 319–327.
- [21] Nothnagl M, Kosiba A, Larsen R U. Predicting the effect of irradiance and temperature on the flower diameter of greenhouse grown chrysanthemum [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 99 (3/4): 319–329.
- [22] 杨可鑫, 赵鑫, 葛红, 等. 不同滴灌施肥模式对切花菊生物量、品质和养分吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29 (4): 777–788.
Yang K X, Zhao X, Ge H, et al. Effects of different drip fertigation regimes on yield, quality and nutrient uptake of cut chrysanthemum [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29 (4): 777–788 (in Chinese with English abstract).
- [23] 肖敏. 切花菊的采收与采后管理 [J]. *中国花卉园艺*, 2008 (24): 24–26.
Xiao M. Harvest and post-harvest management of cut chrysanthemum [J]. *China Flowers & Horticulture*, 2008 (24): 24–26 (in Chinese with English abstract).
- [24] Putti F F, de Queiroz Barcelos J P, Goes B C, et al. Effects of water deficit on growth and productivity in tomato crops irrigated with water treated with very low-frequency electromagnetic resonance fields [J]. *Plants*, 2023, 12 (21): 3721.
- [25] Mofoke A L E, Adewumi J K, Babatunde F E, et al. Yield of tomato grown under continuous-flow drip irrigation in Bauchi state of Nigeria [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84 (1/2): 166–172.
- [26] 方馨妍, 周杨, 汪燕, 等. 不同氮、磷、钾用量对菊花生长及养分吸收和分配的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43 (6): 1015–1023.
DOI: 10.7685/jnau.202001004.
Fang X Y, Zhou Y, Wang Y, et al. Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium application amounts on the growth, nutrient absorption and distribution of chrysanthemum [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43 (6): 1015–1023 (in Chinese with English abstract).
- [27] 于贤磊, 窦超银, 孟维忠, 等. 大棚滴灌水肥一体化对番茄生长和产量的影响 [J]. *北方园艺*, 2017 (17): 7–13.
Yu X L, Dou C Y, Meng W Z, et al. Effects of fertigation application on growth and yield of tomato in greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2017 (17): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- [28] 周杨, 方馨妍, 汪燕, 等. 测土配方施肥对菊花苗期生长发育、土壤性质及养分吸收的影响 [J]. *土壤*, 2021, 53 (1): 118–124.
Zhou Y, Fang X Y, Wang Y, et al. Effects of soil testing and formula fertilization on growth, soil properties and nutrient absorption of chrysanthemum in seedling stage [J]. *Soils*, 2021, 53 (1): 118–124 (in Chinese with English abstract).
- [29] Peco J D, Pérez-López D, Centeno A, et al. Comparison of physiological and biochemical responses of local and commercial tomato varieties under water stress and rehydration [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289: 108529.
- [30] 李春杰, 姚进明, 刘书辉, 等. 光温调控对切花菊‘优香’养分利用及品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2016 (3): 76–81.
Li C J, Yao J M, Liu S H, et al. Effect of light and temperature control techniques on nutrition use and product quality of cut chrysanthemum ‘Yuxiang’ [J]. *Northern Horticulture*, 2016 (3): 76–81 (in Chinese with English abstract).
- [31] Sun Y N, Duan L B, Zhong H Y, et al. Effects of irrigation-fertilization-aeration coupling on yield and quality of greenhouse tomatoes [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 299: 108893.

责任编辑: 范雪梅