

杨 军, 廉晓娟, 王 艳, 等. 滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 656-661.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.03.026

## 滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响

杨 军, 廉晓娟, 王 艳, 张余良, 王正祥

(天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192)

**摘要:** 为揭示滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响, 以期为温室芹菜高产、优质、高效栽培及节水灌溉提供科学依据, 设置 5 个灌溉量处理(T1: 117.5 mm/hm<sup>2</sup>; T2: 160.0 mm/hm<sup>2</sup>; T3: 202.5 mm/hm<sup>2</sup>; T4: 245.0 mm/hm<sup>2</sup> 对照(CK) 287.5 mm/hm<sup>2</sup>), 进行温室内小区试验, 分析不同灌溉量对芹菜产量、耗水量和水分利用效率的影响。结果表明, 不同灌溉量处理 0~40 cm 深土壤贮水量和芹菜耗水量分别呈 T3>T4>CK>T2>T1 和 CK>T4>T3>T2>T1 的趋势; 同时各处理土壤贮水量变化呈随芹菜栽培时间延长而下降、收获期又回升的趋势。不同灌溉量处理水分利用效率和灌溉水利用效率均呈 T1>T2>T3>T4>CK 的趋势。耗水量与灌溉量间达到 0.01 显著正相关水平, 与水分利用效率、灌溉水利用效率间分别达到 0.01 和 0.05 显著负相关水平。灌水量小于 253 mm/hm<sup>2</sup> 时, 芹菜产量与灌溉量间呈极显著正相关关系。芹菜产值与灌水量也成正比关系, T4 处理收益与对照持平, 同时还可节水 14.78%。建议高效日光温室芹菜滴灌栽培灌溉水定额为 245 mm/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 滴灌; 芹菜; 灌溉量; 耗水; 水分利用效率

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)03-0656-06

## Water consumption and water use efficiency of drip-irrigated celery with different irrigation amounts

YANG Jun, LIAN Xiao-juan, WANG Yan, ZHANG Yu-liang, WANG Zheng-xiang

(Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment Sciences, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** Five irrigation treatments (117.5 mm/hm<sup>2</sup> for T1, 160.0 mm/hm<sup>2</sup> for T2, 202.5 mm/hm<sup>2</sup> for T3, 245.0 mm/hm<sup>2</sup> for T4, 287.5 mm/hm<sup>2</sup> for CK) were set for celery irrigation in a plot experiment to study the effects of irrigation amounts on water consumption, water use efficiency (WUE) and celery yield. At the soil depth of 0-40 cm, water storage and consumption followed the order of T3>T4>CK>T2>T1 and CK>T4>T3>T2>T1, respectively, and soil water storage declined over time and then picked up at harvest. Both WUE and irrigation efficiency of different treatments followed the order of T1>T2>T3>T4>CK. Water consumption showed a significantly positive correlation with irrigation amount ( $P<0.01$ ), and significantly negative correlations with WUE ( $P<0.01$ ) and irrigation efficiency ( $P<0.05$ ). The celery yield had a significantly

positive correlation with irrigation amount under 253.0 mm/hm<sup>2</sup>. The output of celery also exhibited a significantly positive correlation with irrigation amount. With 14.78% less water consumption than CK, the income of T4 is equal to CK. Irrigation quota at 245.0 mm/hm<sup>2</sup> and 30.0 mm/hm<sup>2</sup> per irrigation was recommended for celery in greenhouse.

**Key words:** drip irrigation; celery; irrigation amount; water consumption; water use efficiency

收稿日期: 2015-09-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303133-3); 天津市科技计划项目(14ZCDGNC00108); 天津市农业科技成果转化与推广项目(201203030)

作者简介: 杨 军(1982-), 男, 云南石屏人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水肥一体化与土壤养分管理。(E-mail) yangjun821104@163.com

中国季节性、区域性干旱缺水问题十分突出,农业的发展在很大程度上取决于灌溉。随着中国农业用水供需矛盾的日益突出,节水灌溉技术已成为缓解农业用水压力的重要途径之一。芹菜(*Apium graveolens*)属伞形花科的二年生蔬菜,是深受人们喜爱的蔬菜之一,也是中国北方地区冬季日光温室栽培的重要蔬菜。农业部统计数据显示,中国芹菜种植面积近几年都维持在 $5.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 左右,占蔬菜总面积的3%,其中天津芹菜面积为 $8\,000 \text{ hm}^2$ ,占全国芹菜总面积的1.5%<sup>[1]</sup>。多年来在温室芹菜栽培管理上,尤其是水分管理缺乏科学的量化指标,主要是丰水高产型的经验灌溉,过量灌水不但造成水资源浪费,而且会引起日光温室土壤和空气湿度增大,病虫害大量发生,远未达到水分优化管理及高效生产栽培的要求<sup>[2]</sup>。如何达到灌溉水的高效利用和最大的投入产出效益,是生产上急需解决的关键问题。

滴灌是一种局部、高频率供水的灌溉技术,结合施肥具有节水、省肥,并可以使作物近根区保持较高湿度以及合适养分浓度的特点,有利于作物生长,可有效提高作物产量和品质<sup>[3-6]</sup>,国内外研究结果均表明滴灌与其他灌溉方式相比能显著提高水分利用效率14%~35%<sup>[7-8]</sup>。目前,滴灌条件下蔬菜耗水规律、水分利用效率的研究主要集中在黄瓜<sup>[9-10]</sup>、西红柿<sup>[11-12]</sup>、辣椒<sup>[13]</sup>等作物上,针对芹菜的研究主要围绕生长发育<sup>[14]</sup>、产量和品质<sup>[15-16]</sup>、土壤中硝酸盐淋溶<sup>[15,17]</sup>等方面。也有少数学者开展了与芹菜相关的水分管理研究,如马培娟等<sup>[18]</sup>研究了覆膜穴播压沙、露地育苗移栽和露地直播3种植植方式下芹菜的节水效益;张丽娟等<sup>[14]</sup>研究了灌水量、施氮量对芹菜生长发育及产量的影响;谭国栋等<sup>[19]</sup>研究了东北半干旱地区温室芹菜需水量、需水规律、产量与耗水量的关系;张昌爱等<sup>[20]</sup>研究建立了设施芹菜常规灌水条件下水肥耦合效应模型;陈修斌等<sup>[21]</sup>采用3因素二次回归通用旋转组合设计,得到滴灌条件下芹菜最高产量 $82.44 \text{ t/hm}^2$ 时的灌水量为 $103.5 \text{ mm/hm}^2$ 。但针对不同滴灌量下芹菜耗水和水分利用效率的研究尚少见报道。本研究采用小区试验,分析不同灌溉量对芹菜生育期耗水量和水分利用效率的影响,以期为温室芹菜高产、优质、高效栽培及节水灌溉提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2014年8月至2015年1月在天津市武清区天津市农业科学院创新基地内进行。试验区属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,全年平均温度 $11.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,全年日照总量 $2\,810.4 \text{ h}$ ,全年无霜期212 d,自然降雨总量 $606 \text{ mm}$ ,地下水埋深为 $1 \text{ m}$ 。温室东西长 $70 \text{ m}$ ,南北宽 $8 \text{ m}$ ,钢架无柱结构<sup>[22]</sup>。供试土壤类型为重壤质潮土,种植前 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤容质量为 $1.37 \text{ g/cm}^3$ ,有机质含量为 $17.0 \text{ g/kg}$ ,土壤pH值为8.21。前茬作物为黄瓜。

试验前半个月左右,土壤翻耕晒白,结合翻耕施用有机肥 $37\,500 \text{ kg/hm}^2$ 、过磷酸钙 $300 \text{ kg/hm}^2$ (含 $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)、硼砂 $15 \text{ kg/hm}^2$ 。有机肥为商品有机肥(主要成分为鸡粪),其养分(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )含量为2.09%、3.17%、2.67%(干基),有机质含量为44.17%,水分含量为21%。试验所施用的水溶滴灌肥由以下肥料按比例配制而成:尿素(含N 46%)、磷酸二氢钾(含 $\text{P}_2\text{O}_5$  52%、 $\text{K}_2\text{O}$  34%)和硝酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}$  46%)。

### 1.2 试验设计

根据当地农民种植习惯,在大水漫灌的方式下,芹菜整个生育期内的总灌水量平均约为 $300 \text{ mm/hm}^2$ 。本试验以略低于此值为对照,每次灌水量按等差设置5个处理,每个处理3次重复,每个重复1个小畦,面积为 $30 \text{ m}^2$ 。小区间用 $40 \text{ cm}$ 深防水土工布隔离。供试芹菜品种为西雅图,2014年8月中旬育苗,10月初定植。选取苗情基本一致的芹菜苗,按株距 $0.15 \text{ m}$ ,行距 $0.20 \text{ m}$ 进行定植,每小区定植株数一致,种植密度为 $1 \text{ hm}^2$  140 000株。2015年1月中旬收获。芹菜生育期灌溉7次水,分别为定植水(2014年10月5日)、5~6叶期灌溉1次(2014年10月23日)、7~9叶期灌溉2次(2014年11月3日和11月14日)、10~12叶期灌溉3次(2014年12月2日、12月15日和12月29日),所有处理定植水灌溉量为 $75 \text{ mm/hm}^2$ ,其他生育期分别按处理进行灌溉,具体灌溉量见表1。灌水方式为滴灌,每小畦安装滴灌毛管3条,芹菜苗定植于滴管两侧,每畦定植6行。滴灌时用闸阀控制,用水表精确计量各处理灌溉量。所有处理施肥量一致,施

肥方式为滴灌肥溶解后用文丘里施肥器进行滴灌施肥。病虫害防治及除草等日常管理按照当地农民习惯进行。

表1 试验处理设计

Table 1 Design of experimental treatments

| 处理 | 定植<br>灌溉量<br>(mm/hm <sup>2</sup> ) | 分次灌溉量 (mm/hm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      | 灌溉定额<br>(mm/hm <sup>2</sup> ) |
|----|------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|-------------------------------|
|    |                                    | 1                           | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |                               |
| T1 | 75                                 | 5.0                         | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 117.5                         |
| T2 | 75                                 | 10.0                        | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 160.0                         |
| T3 | 75                                 | 15.0                        | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 202.5                         |
| T4 | 75                                 | 20.0                        | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 245.0                         |
| CK | 75                                 | 25.0                        | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 37.5 | 287.5                         |

### 1.3 测定项目及方法

用土钻于试验前、收获后和每次灌水前分0~20.0 cm和20.1~40.0 cm两层采集各处理土壤样品,立即带回实验室用烘干法测定土壤体积含水量。定植前用环刀法测定土壤容质量。芹菜收获时,每个小区单独测定产量。其他参数按以下公式计算:土壤贮水量 $W$ (mm)=土壤体积含水量×土层厚度(mm),贮水量变化 $\Delta S$ (mm)=季末贮水量-初始贮水量,作物生长期耗水量 $ET$ (mm)= $I+P+\Delta W+U$ ,作物水分利用效率 $WUE$ (kg/hm<sup>2</sup>)=经济产量/ $ET$ ,式中, $I$ 为生育期灌溉量(mm), $P$ 是作物生育期降水量(mm), $\Delta W$ 是芹菜收获期与定植前土壤剖面含水量(mm)之差, $U$ 为地下水补给量(mm)。由于温室不受降雨影响,又由于该区地下水位埋深较大,对0~40.0 cm土体影响较小,所以式中 $P$ 和 $U$ 可记为0。

本研究采用Microsoft Excel 2003和DPS统计软件进行数据分析。

表2 不同灌溉量对芹菜经济效益的影响

Table 2 Celery income affected by irrigation amounts

| 处理 | 灌溉定额<br>(mm/hm <sup>2</sup> ) | 产量<br>(kg, 1 hm <sup>2</sup> ) | 产值<br>(元, 1 hm <sup>2</sup> ) | 水费<br>(元, 1 hm <sup>2</sup> ) | 电费<br>(元, 1 hm <sup>2</sup> ) | 收入<br>(元, 1 hm <sup>2</sup> ) | 节水率<br>(%) |
|----|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|
| T1 | 117.5                         | 69 379.12                      | 104 068                       | 1 175                         | 1 880                         | 101 013                       | 59.13      |
| T2 | 160.0                         | 73 181.02                      | 109 771                       | 1 600                         | 2 560                         | 105 611                       | 44.35      |
| T3 | 202.5                         | 79 539.75                      | 119 309                       | 2 025                         | 3 240                         | 114 044                       | 29.57      |
| T4 | 245.0                         | 83 433.34                      | 125 150                       | 2 450                         | 3 920                         | 118 780                       | 14.78      |
| CK | 287.5                         | 84 311.11                      | 126 466                       | 2 875                         | 4 600                         | 118 991                       | -          |

T1~T4处理、CK见表1。芹菜价格按1 kg 1.5元计,水费1 m<sup>3</sup> 1.0元;从600 m深井提升1 m<sup>3</sup>水需电2度,电费0.8元/度。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉量对芹菜产量的影响

由图1可以看出,灌溉量对芹菜的产量影响显著。应用线性加平台模型对灌溉量与芹菜产量进行模拟,结果(图1)显示:当灌溉量低于253.0 mm/hm<sup>2</sup>时,芹菜产量与灌溉量之间呈极显著正相关关系;灌溉量为253.0 mm/hm<sup>2</sup>时,芹菜产量达到最高(83 872 kg/hm<sup>2</sup>);灌溉量超过253.0 mm/hm<sup>2</sup>时,芹菜产量趋于稳定,更多的灌溉并不能使芹菜产量明显增加。

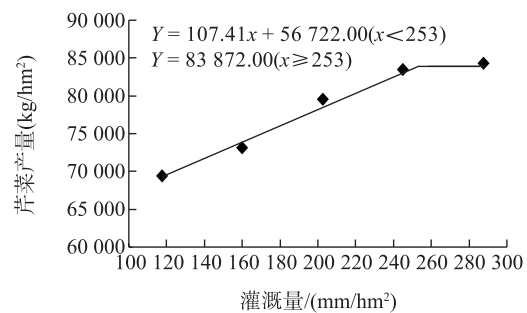


图1 不同灌溉量对芹菜产量的影响

Fig.1 Celery yield affected by irrigation amounts

### 2.2 不同灌溉量下芹菜的经济效益

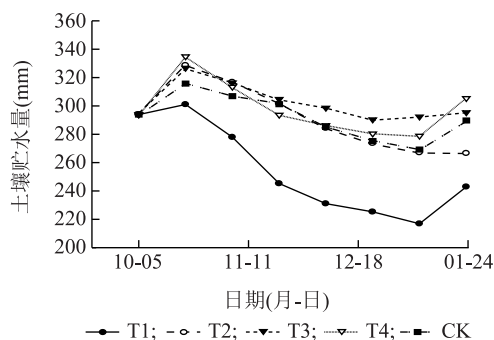
不同灌溉定额处理对芹菜经济效益的影响见表2。由表2可见,芹菜的产值与灌溉量成正比关系,T4处理的产值与对照相差不大,1 hm<sup>2</sup>仅低1 316元。对照的水电成本最高,达到了1 hm<sup>2</sup> 7 475元,而T4处理的水电成本为1 hm<sup>2</sup> 6 370元,因此T4处理的1 hm<sup>2</sup>收益略低于对照211元。各处理均比对照节水,节水率在14.78%至59.13%之间。T4处理在节水14.78%的情况下,基本上可以达到收益

与对照持平,是本试验条件下较好的灌溉处理。

### 2.3 不同灌溉量对土壤贮水量和芹菜耗水量的影响

不同灌溉量处理下 0~40.0 cm 土壤贮水量的动态变化见图 2。从定植到 10 月 23 日第 1 次灌溉前,除 T1 处理外,其他 4 个处理之间贮水量差异不明显,在 315.00 mm 至 335.00 mm 之间;随后的 3 次灌溉前,除 T1 处理外的 4 个处理间土壤贮水量差异均不明显;12 月 2 日灌溉后至收获,4 个处理间贮水量差异逐渐明显,整体呈现 T3>T4>对照>T2 处理的趋势。灌溉量较高的 T3、T4 和对照均在 12 月 29 日灌溉后土壤贮水量呈现增加的趋势,且在收获时贮水量与定植前相当或略有增加。此外,由表 3 可以看出,灌溉量较小的 T1 和 T2 处理季末土壤贮水量比初始分别减少 50.95 mm 和 27.32 mm,说明该灌溉量下,土壤水分含量变化较大,可能对芹菜的正常生长不利;而 T3 和 T4 处理由于灌溉量较大,季末土壤贮水量比初始分别增加 1.53 mm 和 11.55 mm,表明该灌溉量基本可满足芹菜生长需求。

温室条件下,芹菜耗水量主要取决于灌溉量和土壤贮水量变化量。芹菜耗水量随灌溉量增大而增加,4 个处理依次分别比对照减少了 42.24%、35.77%、31.09%和 19.95%(表 3)。T4 处理在耗水量减少 19.95%的情况下,芹菜并未出现明显减产,是较理想的灌溉量。



T1~T4 处理,CK 见表 1。

图 2 不同灌溉量下土壤贮水量

Fig.2 Soil water storage affected by irrigation amounts

### 2.4 不同灌溉量对芹菜水分利用效率的影响

试验结果(表 4)显示,芹菜水分利用效率呈 T1>T2>T3>T4>CK 的趋势,即随灌溉量的增加,芹菜水分利用效率降低。T1~T4 处理分别比 CK 增

加 40.19%、34.71%、32.97%和 19.40%,并且除 T2 与 T3 处理间外,其他处理间差异均达到 0.01 显著水平。灌溉水利用效率同样呈 T1>T2>T3>T4>CK 的趋势,各处理间差异均达到 0.01 显著水平,T1~T4 处理分别比 CK 增加 101.34%、55.96%、33.94%和 16.12%。

表 3 不同灌溉量下的芹菜耗水量

Table 3 Water consumptions of celery affected by irrigation amounts

| 处理 | 初始<br>贮水量<br>(mm) | 季末<br>贮水量<br>(mm) | 贮水量<br>变化(ΔS)<br>(mm) | 生育期<br>灌溉量<br>(I)(mm) | 芹菜<br>耗水量<br>(ET)(mm) |
|----|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T1 | 293.89            | 242.94            | -50.95                | 117.5                 | 168.45                |
| T2 | 293.89            | 266.57            | -27.32                | 160.0                 | 187.32                |
| T3 | 293.89            | 295.42            | 1.53                  | 202.5                 | 200.97                |
| T4 | 293.89            | 305.44            | 11.55                 | 245.0                 | 233.45                |
| CK | 293.89            | 289.74            | -4.15                 | 287.5                 | 291.65                |

T1~T4 处理,CK 见表 1。

表 4 不同灌溉量下的芹菜水分利用效率

Table 4 Water use efficiency of celery affected by irrigation amounts

| 处理 | 芹菜产量<br>(kg/hm <sup>2</sup> ) | 水分利用效率<br>(WUE)<br>[kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)] | 灌溉水<br>利用效率<br>[kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)] |
|----|-------------------------------|---|---|
| T1 | 69 379.12 D                   | 411.87 A                                      | 590.46 A                                  |
| T2 | 73 181.02 C                   | 395.78 B                                      | 457.38 B                                  |
| T3 | 79 539.75 B                   | 390.67 B                                      | 392.79 C                                  |
| T4 | 83 433.34 A                   | 350.81 C                                      | 340.54 D                                  |
| CK | 84 311.11 A                   | 293.80 D                                      | 293.26 E                                  |

T1~T4 处理,CK 见表 1。同一列中字母不同表示在 0.01 水平上差异显著。

另外,所有处理耗水量和灌溉量之间均达到极显著正相关( $Y = 0.688 \ 3x + 76.988 \ 0$ ,  $R^2 = 0.916 \ 6^{**}$ ,  $n = 5$ ),耗水量和水分利用效率之间达到极显著负相关( $Y = -1.014 \ 2x + 590.190 \ 0$ ,  $R^2 = 0.992 \ 7^{**}$ ,  $n = 5$ ),耗水量和灌溉水利用效率之间达到显著负相关( $Y = -0.369 \ 3x + 369.570 \ 0$ ,  $R^2 = 0.780 \ 5^*$ ,  $n = 5$ )。

## 3 讨论

芹菜是一种耗水量较大的作物,灌溉对芹菜的生长发育至关重要,生长过程中水分亏缺、过剩及土壤中水分波动较大都会影响芹菜的产量。充分利用



土壤贮水是减少灌溉水,提高水分利用效率的有效途径<sup>[23]</sup>。对于芹菜等根系较浅的作物来说,过多的灌溉量未必能增加土壤中的有效水分,反而增加了下渗出有效土体的水量。另一方面,过低的灌溉量( $117.5\text{ mm/hm}^2$ )不能对土体贮水量进行有效补充,土体贮水量在芹菜生育期内持续下降,将限制芹菜的生长发育以致降低芹菜产量。本试验结果表明,不同灌溉量处理下, $0\sim 40.0\text{ cm}$ 土体贮水量呈现灌溉量 $202.5\text{ mm/hm}^2 > 245.0\text{ mm/hm}^2 > 287.5\text{ mm/hm}^2 > 160.0\text{ mm/hm}^2 > 117.5\text{ mm/hm}^2$ 处理的趋势,并未呈现随灌溉量增加,土壤贮水量也升高的趋势,说明适宜的灌溉量可增加土壤贮水量,这与孔德杰等<sup>[9]</sup>的研究结论相符; $202.5\text{ mm/hm}^2$ 和 $245.0\text{ mm/hm}^2$ 的灌溉量处理使 $40.0\text{ cm}$ 土体内土壤贮水量维持较高水平,从而可保证芹菜的正常生长。

随着灌溉量增加,作物耗水量增加<sup>[24]</sup>,灌溉水利用效率逐渐降低。Sun等<sup>[25]</sup>研究结果表明,在作物产量水平较低时,产量随耗水量的增加近似线性上升,当产量达到最高水平后,随耗水量的增加,反而下降,呈抛物线关系。本研究中,随灌溉量的增加,芹菜耗水量显著增加,这与前人的研究结果一致;随灌溉量的增加,水分利用效率呈逐渐减少的趋势,这与赵良菊等<sup>[26]</sup>在春小麦上,夏桂敏等<sup>[27]</sup>在黑花生上的研究结果一致。耗水量较高的对照( $287.5\text{ mm/hm}^2$ )和 $245.0\text{ mm/hm}^2$ 处理获得的芹菜产量最高,并显著高于其他处理,但前两者之间无显著差异; $245.0\text{ mm/hm}^2$ 处理的灌溉水利用效率和水分利用效率高于对照,且相对节水 $14.78\%$ 。

一般认为,在其他条件一致的前提下,产量会随着灌溉量的增加而增加,但达到某一限值时,产量增加不明显甚至会下降。张丽娟等<sup>[14]</sup>研究指出随灌溉量减少,芹菜产量逐渐下降。本试验也得到类似结果,即随着灌溉定额的增加,产量先快速增加后增速变缓。由于试验地气候、土壤条件、芹菜品种等差异,不同试验研究的结论差异很大,如畦灌条件下,谭国栋等<sup>[19]</sup>在东北半干旱地区温室的研究结果为芹菜灌溉定额为 $270.0\text{ mm/hm}^2$ 时可保持高产,产量约为 $97\ 500\text{ kg/hm}^2$ 。而滴灌条件下,陈修斌等<sup>[18]</sup>在甘肃地区的研究结果为芹菜最高产量 $82\ 440\text{ kg/hm}^2$ 时的灌溉量仅为 $1\ 035\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,种植时期为12月至次年4月。本试验结果与上述结果有的相似,有的差异较大,因此研究结论在实际应用时,还

需进一步验证完善,才可用于指导当地的芹菜生产。

总之,灌溉定额为 $245.0\text{ mm/hm}^2$ 、每次灌溉量为 $30.0\text{ mm/hm}^2$ 的T4处理, $0\sim 40.0\text{ cm}$ 土体贮水量较高,且较稳定,耗水量比对照低 $19.95\%$ ,虽然水分利用效率和灌溉水利用效率低于其他处理,但也显著高于对照,并且芹菜产量最高,是本试验条件下兼顾高产与节水的最优灌溉措施。

#### 参考文献:

- [1] 朱鑫,高国训,靳力争.早春大棚芹菜生长发育规律研究[J].长江蔬菜,2010(6):19-23.
- [2] 梁媛媛,孙景生,郭凤台,等.日光温室芹菜适宜灌溉指标研究[J].灌溉排水学报,2009,28(2):48-50.
- [3] 祁金虎,张玉龙.滴灌灌水控制下限对温室番茄产量、品质、水分利用效率的影响[J].江苏农业科学,2014,42(12):198-201.
- [4] 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等.滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J].中国农业科学,2006,39(3):563-568.
- [5] 李世峰,刘蓉蓉,吴九林.膜下滴灌水稻不同穗肥运筹处理对水稻产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(11):97-99.
- [6] 杨平飞,李素丽,周丰静,等.滴灌对甘蔗伸长期品质和产量的影响[J].南方农业学报,2014,45(5):803-807.
- [7] WANG J D, GONG S H, XU D, et al. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5): 1025-1037.
- [8] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙江流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013,39(9):1687-1692.
- [9] 孔德杰,张源沛,郭生虎,等.不同灌水量对日光温室黄瓜耗水规律及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):42-47.
- [10] GUO S H, KONG D J, ZHANG Y P, et al. Effects of different irrigation amounts on water consumption and water use efficiency of greenhouse cucumber[J]. Agriculture Science & Technology, 2010, 11(9-10): 217-220.
- [11] 孔德杰,郑国保,张源沛,等.宁夏设施番茄膜下滴灌条件下耗水规律和水分利用效率[J].西北农业学报,2011,20(1):119-123.
- [12] 孔德杰,张源沛,郑国保,等.不同灌水量对日光温室番茄耗水规律的影响[J].农业科学研究,2010,31(4):53-55.
- [13] 李全辉,李江,张广楠,等.不同灌水量对青海高原地区线辣椒产量和耗水规律的影响[J].北方园艺,2013(9):8-11.
- [14] 张丽娟,曲继松,杨冬艳,等.黄河上游地区节水减氮对设施越冬芹菜生长发育及产量的影响[J].北方园艺,2011(11):53-55.
- [15] 高伟,朱静华,李明悦,等.有机无机肥料配合施用对设施条件下芹菜产量、品质及硝酸盐淋溶的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):657-664.

- [16] 熊又升,陈明亮,何圆球,等.包膜尿素对芹菜产量、品质及氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(1):104-109.
- [17] 于 涛,苏黎,牛世伟,等.化肥优化减施对芹菜产量和品质以及硝酸盐淋溶的影响[J].中国土壤与肥料,2012(3):55-58.
- [18] 马培娟,代国鹏,闫菊红,等.芹菜不同种植方式节水效益研究[J].蔬菜,2014(1):9-10.
- [19] 谭国栋,付德洋,凡久彬,等.东北半干旱地区温室芹菜灌水指标试验研究[J].南水北调与水利科技,2006,4(2):20-23.
- [20] 张昌爱,张 民,马 丽,等.设施芹菜水肥耦合效应模型探析[J].中国生态农业学报,2006,14(1):145-148.
- [21] 陈修斌,杨 彬,鄂利锋,等.荒漠化地区温室芹菜水肥耦合效应量化管理指标[J].江苏农业学报,2008,24(5):674-678.
- [22] 廉晓娟,王 艳,杨 军,等.日光温室青花菜耗水规律及水分利用效率的研究[J].节水灌溉,2015(1):33-35.
- [23] 马尚宇,于振文,张永丽,等.不同畦宽灌溉对小麦耗水特性和产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(8):1531-1540.
- [24] 于利鹏,黄冠华,刘海军,等.喷灌灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2031-2037.
- [25] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85: 211-218.
- [26] 赵良菊,肖洪浪,李新荣,等.灌水量对土壤水肥分布与春小麦水分利用效率的影响[J].中国沙漠,2005,25(2):256-261.
- [27] 夏桂敏,褚凤英,陈俊秀,等.基于膜下滴灌的不同灌水量对黑花生产量及水分利用效率的影响[J].沈阳农业大学学报,2015,46(1):119-123.

(责任编辑:张震林)