

文章编号: 1672-3317(2023)12-0022-06

# 设施滴灌土壤水分调控对水果萝卜生长和产量的影响

陈柯<sup>1</sup>, 刘文欣<sup>1</sup>, 冯棣<sup>1\*</sup>, 祝海燕<sup>1</sup>, 张敬敏<sup>1</sup>, 桑晓明<sup>2</sup>, 丁发强<sup>2</sup>, 孙小桢<sup>1</sup>

(1. 潍坊科技学院/山东省高校设施园艺重点实验室, 山东 寿光 262700;

2. 寿光市农业农村局, 山东 寿光 262700)

**摘要:** 【目的】探寻设施秋茬水果萝卜高产高效滴灌灌溉制度。【方法】以“冰淇淋”水果萝卜为供试对象, 基于田间试验设置了5个灌溉下限土壤基质势阈值, 分别为-10 kPa (T1)、-20 kPa (T2)、-30 kPa (T3)、-40 kPa (T4)、-50 kPa (T5), 灌水定额均为10 mm, 研究不同灌溉下限对水果萝卜生长、产量、品质和灌溉水利用率(IWUE)的影响。【结果】随着灌溉下限土壤基质势阈值的降低, 萝卜的叶面积、叶鲜质量以及肉质根的直径、根长、根体积和根质量均呈下降趋势, 其中在各处理间根长差异不显著, T3、T4、T5处理下其余指标均显著低于T1处理, 而T1处理和T2处理之间仅叶面积差异显著。与T1处理相比, T2—T5处理产量分别降低2.2%、29.9%、37.3%、44.0%。与T1处理相比, T2处理的IWUE增加了17.3%, 而T3—T5处理降低了4.1%~6.6%。随着灌溉下限土壤基质势阈值的降低, 萝卜可溶性固形物量呈先增加后降低的趋势, T2处理可溶性固形物量最大; Vc量呈增加趋势, T5处理Vc量最大。【结论】综上所述, 控制灌溉下限土壤基质势阈值为-20 kPa、且灌水定额为10 mm时, 设施水果萝卜可以在获得高产的同时大幅提高IWUE。

**关键词:** 灌溉制度; 滴灌; 萝卜; 产量; 灌溉水利用效率

中图分类号: S275.6; S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023185

OSID:



陈柯, 刘文欣, 冯棣, 等. 设施滴灌土壤水分调控对水果萝卜生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 22-27.

CHEN Ke, LIU Wenxin, FENG Di, et al. Effects of Soil Water Regulation on Growth and Yield of Fruit Radish under Drip Irrigation in Greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 22-27.

## 0 引言

【研究意义】我国人均水资源占有量仅为世界人均的1/4, 是全球人均水资源最贫乏的国家之一。水资源匮乏对农业生产带来的限制受到了越来越多的关注。在此背景下如何高效地利用有限的水资源进行农业生产是我国农业可持续发展面临的重要课题<sup>[1]</sup>。设施农业是一种高效、集约的现代农业生产方式, 而节水灌溉技术的发展与应用是其先进程度的重要特征之一。在众多灌水技术中, 滴灌是最具代表性的节水灌溉技术之一, 具有提高水肥利用效率、对土壤温度和结构的影响小等显著优势<sup>[2-4]</sup>。在灌水技术选定的条件下, 精准的灌水时间以及灌水量是农业生产实践中需要解决的难题。【研究进展】前人<sup>[5-7]</sup>针对不同作物适宜的灌水指标、灌溉下限阈值和灌水定额开展了大量研究。通用的方法是采用田间持水率作为参考指标指导灌溉<sup>[5-6]</sup>。然而, 该方法的工作量相对较大, 为了适应滴灌点源局部灌溉

的特点, 学者探寻了一些简单的土壤水分监测指标。其中, 康跃虎<sup>[7]</sup>提出将负压计埋设在滴头正下方20 cm处监测土壤水势, 每次灌水量相同, 可用于指导设施作物灌溉。之后很多学者采用该方法先后针对马铃薯<sup>[8]</sup>、萝卜<sup>[9]</sup>、西红柿<sup>[10]</sup>、枸杞<sup>[11]</sup>、豇豆<sup>[12]</sup>、生菜<sup>[13]</sup>等植物开展了研究工作, 发现适宜的灌溉下限阈值分别为-25、-35、-50、-20、-50、-30 kPa。在控制滴头正下方20 cm土层深度土壤基质势为-15~30 kPa时, 可显著提高黄瓜水分利用效率<sup>[14]</sup>。张玉豪等<sup>[15]</sup>研究发现, 将滴灌滴头正下方20 cm土层深度土壤基质势阈值控制在-20 kPa时, 可显著提高红杉叶片的叶绿素量和净光合速率, 有利于光合作用的进行和有机物的积累, 同时有利于叶片多糖的积累。焦艳平等<sup>[16]</sup>研究发现, 在华北地区日光温室覆膜滴灌条件下20 cm土层深度处土壤基质势为-20~30 kPa时, 能提高秋冬茬彩椒的产量以及品质。

萝卜是全球性十大蔬菜之一, 在我国的种植面积接近世界萝卜种植总面积的50%, 是仅次于白菜的第二大蔬菜。“冰淇淋”水果萝卜是一个新引进我国的品种, 该品种萝卜外皮色彩层次感高、肉质细腻、脆甜、脂肪量低且富含花青素, 广受好评。然而, 在其生产中因为灌水管理不当存在萝卜皮开裂的情况, 严重影响了萝卜的外观品质和销售, 给

收稿日期: 2023-04-26

修回日期: 2023-09-07

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME154); 潍坊科技学院校级课题(2022XJSK06)

作者简介: 陈柯(2001-), 男, 河南信阳人。主要研究方向为设施农业科学与工程。E-mail: 2409010351@qq.com

通信作者: 冯棣(1985-), 男, 河北兴隆人。副教授, 主要研究方向为水资源高效利用。E-mail: fengdi2008sunny@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

农民带来经济损失。以往研究表明<sup>[17-18]</sup>，灌水过多会导致萝卜烂根，加重病害的发生；灌水过少，会导致萝卜生长过程中缺水，造成生长缓慢、甚至萎蔫，此时若进行充分灌溉，肉质根的果肉细胞迅速生长，且生长速度快于萝卜皮，导致肉质根外皮开裂和营养质量降低。【切入点】关于设施“冰淇淋”水果萝卜的适宜灌溉下限尚不清楚。【拟解决的关键问题】基于此，设置不同土壤基质势灌溉下限，研究其对设施“冰淇淋”水果萝卜生长状况、产量、品质和灌溉水利用效率的影响，以期为指导实际农业生产和促进其种植推广提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与管理

试验于 2022 年 9—11 月在山东寿光市潍坊科技学院试验基地拱棚内开展，基地位于鲁中北部沿海平原区，地势平坦，土壤质地为壤土，土壤含盐量和 pH 值分别为 0.04% 和 7.41，有机质量、全氮量、有效磷量、速效钾量分别为 12.9 g/kg、0.84 g/kg、7.75 mg/kg、127.5 mg/kg。供试作物为“冰淇淋”水果萝卜（下文简称萝卜），萝卜于 2022 年 8 月 23 日穴盘育苗，播后浇水，晴天每天浇水 1 次、阴雨天不浇水。

### 1.2 试验设计

设置 5 个灌溉下限处理，土壤基质势阈值分别为 -10 kPa (T1)、-20 kPa (T2)、-30 kPa (T3)、-40 kPa (T4)、-50 kPa (T5)，其中 T1 处理为充分灌水处理。每个小区长 3 m，宽 1.2 m，小区内种植 2 行萝卜，一共 20 株，株间距为 30 cm，行间距为 60 cm。每个处理 2 次重复，采用单因素随机试验设计。萝卜苗于 2022 年 9 月 3 日移栽，随后每个小区铺设 2 条滴灌带，其间距与萝卜行间距一致，且保证每个滴头与萝卜苗对应，滴头距离为 2 cm。在每个处理中间部位随机选择 1 个滴头在其正下方 20 cm 处安装 1 支负压计，用于监测土壤基质势，当每个处理土壤基质势低于该小区的设定阈值时进行灌水，首次灌水 30 mm，之后每次灌水定额为 10 mm，T1—T5 处理的总灌水量分别为 120、100、90、80、70 mm。施肥频率为 7 d/次，随灌水施肥，若未达到灌水下限，则将肥料随灌水定额的 1/3 施入，复合肥 (N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O 20-20-20+TE，TE 含 Fe+Zn+B≥0.21%，其中，含铁 (EDTA-Fe) 量 0.07%，含锌 (EDTA-Zn) 量：0.07%，含硼 (B) 量：0.07%)，单次复合肥施用 1.1 g/株，总施肥量为 610 kg/hm<sup>2</sup>。在萝卜生长期间及时进行田间除草、杀虫等工作。

### 1.3 测定项目与方法

收获期在每个小区随机选取 6 棵长势均匀良好

的萝卜进行测定，每个处理 2 次重复。

#### 1) 生长指标的测定

叶面积的测定：取地上部用直尺测量每个叶片表面的最长与最宽的部分，之后用打孔器（孔径  $2r=5.5$  cm）在每个叶片不同部位打孔 3 次，注意不同叶片打孔位置尽量相同，且避开主叶脉处和枯萎的部分，将打孔器打下的圆叶片烘干（75 °C 下烘干 24 h）并称质量 ( $W_{\text{圆}}$ , g)；打孔后剩余部分烘干并称质量 ( $W_{\text{余}}$ , g)。叶面积计算式为：

$$\text{叶面积 } S(\text{cm}^2) = L \times D \times k, \quad (1)$$

$$k = \frac{n\pi r^2 \sum_{i=1}^m (nW_{\text{圆}i}W_{\text{余}i})}{\sum_{i=1}^m nW_{\text{圆}i} \times \sum_{i=1}^m (L_i \times D_i)}, \quad (2)$$

式中： $L$  为萝卜叶长 (cm)； $D$  为萝卜叶宽 (cm)； $k$  为萝卜叶面积校正系数； $n$  为叶片打孔数； $m$  为总叶片数； $i$  为第  $i$  片叶。

用精度为 0.01 g 的天平分别称量单株叶片与肉质根的质量，并计算萝卜产量；用游标卡尺和卷尺测量肉质根直径与肉质根长；采用排水体积法测定肉质根体积，使用带有刻度的容器，容器内盛放一定量的水记为初始刻度，将萝卜（外表擦干，不带叶片）放入容器后水位（能淹没过全部萝卜）刻度记为最终刻度，2 个刻度的差值换算成萝卜肉质根体积。

#### 2) 灌溉水利用效率及萝卜品质的测定

灌溉水利用效率 ( $IWUE$ )，即产量与灌水量的比值。将测完形态指标的萝卜样品，取每棵根部中间部位约 2 cm 厚度，每个处理混合在一起榨汁，并测定萝卜肉品质指标（可溶性固形物量、Vc 量、可溶性蛋白质质量和电解质量）。用数显糖度计 (LC-DR-32B，上海力辰仪器科技有限公司) 测定果实中可溶性固形物量。使用还原型抗坏血酸 (ASA) 量测定试剂盒和 BCA 法蛋白质测定试剂盒测定果实中的 Vc 量和可溶性蛋白质质量（紫外分光光度计 752Pro，上海棱光技术有限公司；试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司）。果肉电解质量采用电导率 ( $EC$ ) 来表征<sup>[19]</sup>，分别称取汁液 10 mL 和去离子水 40 mL 混合在一起，充分搅拌 3 min，后采用电导率仪（雷磁 DDS-307A，上海仪电科学仪器股份有限公司）测量。

### 1.4 数据分析

用 Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 26.0 对数据进行分析 and 差异显著性 ( $P < 0.05$ ) 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验期间设施内空气温度、空气湿度变化趋势

图 1 为试验期间大棚内空气温度和空气湿度。由图 1 可知，受季节影响，棚内最高气温、平均气

温和最低气温整体呈下降趋势，日温差变幅较大。9月15日，棚内温差最小为4.7℃；9月25日、10月19日，昼夜温差达到了31.4℃，空气温度在10月

1日后明显下降。棚内的最高湿度变幅较小，日湿度差逐渐减小。

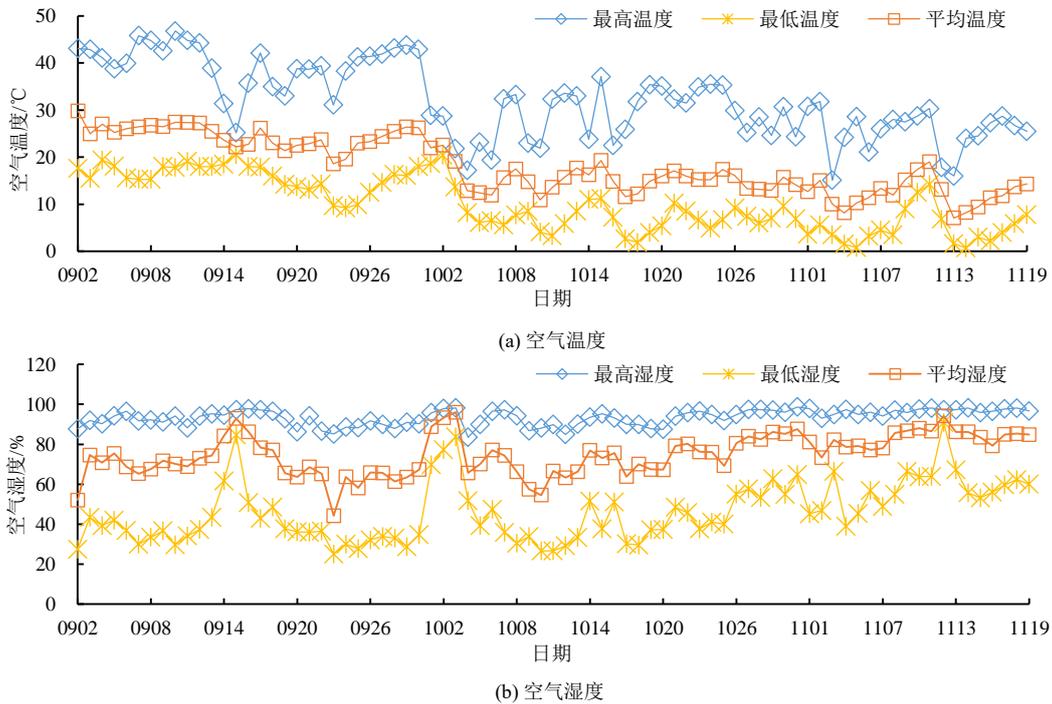


图1 萝卜生长季大棚内空气温度、空气湿度变化

Fig.1 The variation trend of temperature and humidity in greenhouse during radish growing season

## 2.2 不同滴灌制度对萝卜叶片生长状况的影响

图2为不同滴灌制度下萝卜叶片生长状况，图中不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著，下同。由图2可知，随着土壤基质势阈值的降低，各处理单株叶鲜质量和叶面积均呈下降趋势。

与T1处理相比，T2、T3、T4、T5处理的叶鲜质量分别降低了1%、29.9%、50%、51.8%，其中T3、T4、T5处理叶鲜质量显著下降( $P<0.05$ )；与T1处理相比，T2—T5处理的单株叶面积分别显著降低了22.7%、42.4%、49.8%、43% ( $P<0.05$ )。

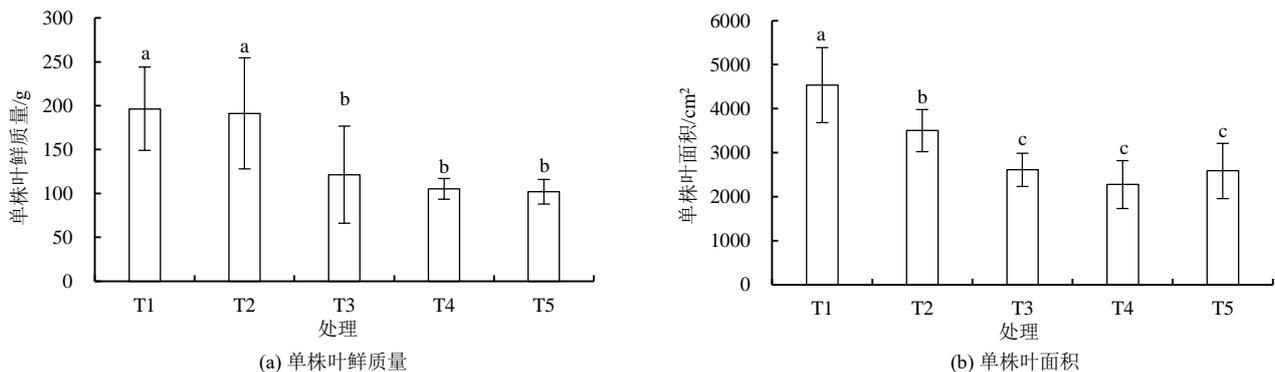


图2 不同滴灌制度下萝卜单株叶鲜质量和叶面积

Fig.2 Leaf fresh weight and leaf area of radish under different drip irrigation systems

## 2.3 不同滴灌制度对萝卜根部生长状况的影响

由表1可知，随着土壤基质势阈值的降低，萝卜肉质根直径、根质量和根体积均呈降低趋势，均表现为：T1处理>T2处理>T3处理>T4处理>T5处理；根长随土壤基质势降低呈先增加后降低的趋势，T2处理根长最大。与T1处理相比，T2、T3、T4、T5处理的肉质根直径降低了6.7%、14.5%、25.8%、26.5%；与T1处理相比，T2、T3、T4、T5处理根

质量分别降低了2.1%、27.5%、34.6%、42.9%；与T1处理相比，T2、T3、T4、T5处理根体积分别降低了1.1%、28%、32.5%、41.7%；与T1处理相比，T3、T4、T5处理的根直径、根质量、根体积显著降低( $P<0.05$ )；不同灌溉下限处理间根长差异不显著。整体来看，T1、T2处理的萝卜肉质根形态差异不显著，故适当地减少灌水量对肉质根生长发育影响不大。

表 1 不同滴灌制度下萝卜肉质根形态指标

Table 1 Indicators of radish root under different drip irrigation systems

处理	根直径/mm	根长/cm	根质量/g	根体积/cm <sup>3</sup>
T1	79.9±3.22 a	24.08±3.03 a	678.65±45.98 a	733±97.9 a
T2	74.54±3.92 ab	24.6±2.29 a	664.44±85.6 a	725±85.2 a
T3	68.3±7.52 b	23.83±4.83 a	491.85±92.8 b	527.5±91.9 b
T4	59.28±4.83 c	23.35±4.89 a	443.83±55.74 bc	494.67±62.0 b
T5	58.72±4.48 c	21.88±1.38 a	387.78±31.02 c	427±36.9 b

注 不同小写字母表示各处理间在  $P<0.05$  水平差异显著, 下同。

#### 2.4 不同滴灌制度下的萝卜灌溉水利用效率 (IWUE)

由表 2 可知, 随着土壤基质势阈值的降低, 萝卜产量和灌水量均呈递减趋势, 但是 IWUE 呈先增加后降低的趋势, T2 处理萝卜 IWUE 最大。与 T1 处理相比, T2、T3、T4、T5 处理萝卜产量分别降低 2.2%、29.9%、37.3%、44%, 其中 T3、T4、T5 处理与 T1 处理差异显著 ( $P<0.05$ ); T3、T4、T5 处理的灌溉水利用效率较 T1 处理降低 6.6%、5.9%、4.8%, 而 T2 处理较 T1 处理增加 17.3%。故 T2 处理萝卜 IWUE 最高且产量未显著降低。

#### 2.5 不同滴灌制度对萝卜肉质根品质的影响

由图 3 可知, 随着土壤基质势阈值的降低, 肉质

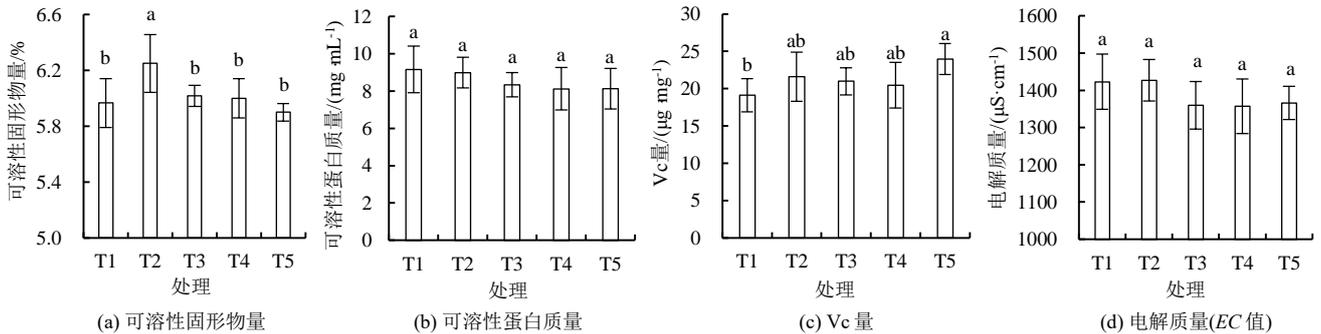


图 3 不同滴灌制度下萝卜可溶性固形物量、可溶性蛋白质质量、Vc 量和电解质量

Fig.3 Soluble solids content, protein content, Vc content and electrolytic content of radish under different drip irrigation systems

### 3 讨论

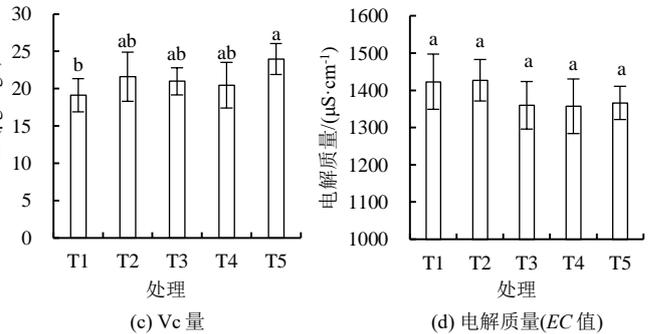
灌水过量既不利于萝卜的生长发育同时还浪费水资源, 灌水过少则会影响萝卜产量和品质, 因此在萝卜的生长过程中精准控制灌水量是提高萝卜产量和品质的重要技术之一。刘浩等<sup>[20]</sup>研究发现, 土壤水分过高或过低都不利于萝卜生长和产量的增加, 土壤水分控制在田间持水率的 70% 时, 温室萝卜增产和节水效果最佳。土壤基质势与土壤含水率成正比<sup>[21]</sup>。本研究表明, 设施萝卜的地上部与地下部的形态指标随灌水总量的降低呈下降趋势, 与韩海霞等<sup>[22]</sup>报道灌水量与萝卜地上、地下部生长指标成正比的结论一致。叶片是萝卜光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等的主要器官, T1、T2 处理的叶片长势最佳, 有利于有机物质积累。随着土壤基质势的降低, 萝卜叶面积显著降低, 由叶片产生的光合产物减少,

根鲜肉中可溶性固形物量呈先增加后降低的趋势, T2 处理肉质根鲜肉中可溶性固形物量最高, 较 T1 处理显著增加了 4.7%, T2 处理显著高于 T1、T3、T4、T5 处理; 可溶性蛋白质量随土壤基质势阈值的降低呈降低趋势, 但 5 个处理之间差异不显著 ( $P\geq 0.05$ ); 各处理肉质根鲜肉中 Vc 量变化趋势表现为: T5 处理>T2 处理>T3 处理>T4 处理>T1 处理, 与 T1 处理相比, T2、T3、T4、T5 处理 Vc 量分别增加 13%、9.8%、7%、25.3%, 其中 T5 处理 Vc 量显著 ( $P<0.05$ ) 高于 T1 处理, 其余处理间差异不显著; 各处理肉质根鲜肉中电解质质量差异不显著。整体而言, 除 T5 处理肉质根 Vc 量显著增加外, 土壤基质势阈值降低对其他品质指标无显著影响。

表 2 不同滴灌制度对产量和 IWUE 的影响

Table 2 Effects of different drip irrigation systems on yield and IWUE

处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	灌水量/mm	IWUE/(kg·m <sup>-3</sup> )
T1	48 619.2±3 832.32 a	120	40.52±3.19 b
T2	47 547.4±4 946.67 a	100	47.55±4.95 a
T3	34 071.9±7 762.16 b	90	37.86±8.62 b
T4	30 505.2±3 260.12 bc	80	38.13±4.06 b
T5	27 211.8±2 311.90 c	70	38.87±3.30 b



进而向根茎转移的物质减少, 萝卜产量随之降低。即生长过程中发生水分亏缺会抑制萝卜地上和地下部的生长, 最终导致减产。冯志文等<sup>[23]</sup>研究发现, 当 20 cm 土层深度土壤基质势控制在 -10 kPa 或 -20 kPa 以上时马铃薯的产量差异不显著, 这与本研究结论一致。本研究中土壤基质势下限为 -20 kPa 处理 IWUE 最大, 这与 Hegde<sup>[24]</sup>研究结果基本一致; 但该土壤基质势下限阈值高于 Kang 等<sup>[9]</sup>推荐的大田萝卜灌水控制下限 -35 kPa, 可能的原因是: ① 试验环境不同, Kang 等<sup>[9]</sup>的研究是在露天条件下进行的, 试验期间会受降水的影响, 而本研究在设施条件下开展的, 无法得到降水补给, 并且设施内气温较高, 作物对水分需求更大; ② 萝卜品种差异, 本试验采用的萝卜品种不同于常规的萝卜品种, 肉质更加细腻清脆, 因此对水分的敏感度更高。杨会颖等<sup>[25]</sup>研究发现, 辣椒的水分利用效率随土壤基质势的降低

呈先增加后降低的趋势,土壤基质势下限为-30 kPa 处理的水分利用效率最高,这与本研究水分利用效率整体变化趋势一致。这主要是因为作物对水分敏感度不同,所以灌水下限也存在差异;此外,同一种作物也会因为品种、种植环境等存在差异而需要设置不同的灌水下限。

本研究表明,萝卜的可溶性固形物量随土壤基质势阈值的降低呈先增加后降低的趋势,这与高彦婷等<sup>[26]</sup>研究结果一致。范海燕等<sup>[27]</sup>研究表明,高水分处理的白萝卜 Vc 量较低,这与本研究基本一致,这是因为在低土壤基质势处理下萝卜会遭受一定程度的干旱胁迫,此时更高的 Vc 量有利于抵抗由于干旱引起的氧化损伤。路瑶瑶等<sup>[28]</sup>研究表明,红花的可溶性蛋白质量随土壤基质势的降低而降低,在本试验中萝卜可溶性蛋白质量也呈下降趋势,但各处理间差异并不显著,这可能是由于该指标在不同物种间对水分亏缺的敏感程度不同。本研究表明,不同灌溉下限土壤基质势阈值对萝卜形态指标的影响大于肉质根的品质指标。

## 4 结论

1) 与高灌水下限处理(-10、-20 kPa 处理)相比,灌溉下限土壤基质势阈值低于-20 kPa 时,萝卜的叶片长势和产量显著降低。土壤基质势阈值为-20 kPa 时,灌溉水利用效率最高。

2) 随灌溉下限土壤基质势阈值的降低,萝卜的可溶性固形物量呈先增加后降低的趋势,灌溉下限土壤基质势阈值-20 kPa 处理的可溶性固形物量最大;随着灌溉下限土壤基质势阈值的降低,萝卜可溶性蛋白质量呈下降趋势,灌溉下限土壤基质势阈值-50 kPa 处理的萝卜可溶性蛋白质量最小,但 5 个处理间差异不明显;灌溉下限土壤基质势阈值-50 kPa 处理的萝卜 Vc 量最大,灌溉下限土壤基质势阈值-10 kPa 处理萝卜 Vc 量最小。

3) 设施“冰淇淋”水果萝卜栽培中,控制滴头正下方 20 cm 处土壤基质势阈值为-20 kPa,灌水定额为 10 mm 时,萝卜的长势最佳,并且在获得高产的同时大幅提高 IWUE。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献:

- 连波. 基于可持续发展观的农业水资源高效利用对策一评《农业水资源有效配置的经济分析》[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 132.
- 王军涛, 李根东, 宋常吉, 等. 黄河灌区高效节水灌溉发展对策与建议[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 111-114.  
WANG Juntao, LI Gendong, SONG Changji, et al. Development countermeasures and suggestions for highly-efficient water-saving irrigation of the Yellow River irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 111-114.
- 李明思, 郝忠文, 徐亚南, 等. 滴灌技术适应性分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 5-8.  
LI Mingsi, HAO Zhongwen, XU Ya'nian, et al. Analysis on the application conditions of the drip irrigation technique[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(12): 5-8.
- 张志远. 滴灌技术在农业生产中的应用研究[J]. 乡村科技, 2022, 13(3): 149-151.
- 于润, 樊贵盛. 农田耕作土壤田间持水率的 BP 预测模型[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 108-112.  
YU Jin, FAN Guisheng. BP prediction model tillage of soil water content at field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 108-112.
- 刘继龙, 徐清, 李林, 等. 黑土区农田尺度田间持水率的空间异质性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 55-61, 124.  
LIU Jilong, XU Qing, LI Lin, et al. Spatial heterogeneity of field capacity of chernozem soil in Northeast of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 55-61, 124.
- 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. 节水灌溉, 2004(3): 11-12, 15.  
KANG Yuehu. Applied method for drip irrigation scheduling[J]. Water Saving Irrigation, 2004(3): 11-12, 15.
- WANG Fengxin, KANG Yaohu, LIU Shiping, et al. Effects of soil matrix potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 88(1): 34-42.
- KANG Yaohu, WAN Shuqin. Effect of soil water potential on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use under drip irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 106(3): 275-292.
- WANG Dan, KANG Yaohu, WAN Shuqin. Effect of soil matrix potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(2): 180-186.
- 贾俊妹, 康跃虎, 万书勤, 等. 不同土壤基质势对滴灌枸杞生长的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 81-84.  
JIA Junshu, KANG Yuehu, WAN Shuqin, et al. Effect of soil matrix potential on *Lycium barbarum* L. growth under drip-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(6): 81-84.
- 张超, 康跃虎, 万书勤, 等. 滴灌条件下土壤基质势对豇豆产量和灌溉水利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 30-33.  
ZHANG Chao, KANG Yuehu, WAN Shuqin, et al. Effects of soil matrix potential on cowpea yield and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 30-33.
- 蒋树芳, 万书勤, 康跃虎, 等. 华北地区滴灌控制基质势对生菜产量和水分利用的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 72-76.  
JIANG Shufang, WAN Shuqin, KANG Yuehu, et al. Effects of soil potential on lettuce growth and water use efficiency under drip irrigation in semi-humid regions of North China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(6): 72-76.
- SUOJALA-AHLFORS T, SALO T. Growth and yield of pickling cucumber in different soil moisture circumstances[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 107(1): 11-16.
- 张玉豪, 姚素梅, 孟丽, 等. 滴灌土壤基质势调控对红豆杉生理特性及次生代谢物含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 129-137.  
ZHANG Yuhao, YAO Sumei, MENG Li, et al. Effect of regulating soil matrix potential under drip irrigation on physiological characteristics and secondary metabolite contents of *Taxus chinensis*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 129-137.
- 焦艳平, 张艳红, 赵勇. 日光温室滴灌条件下土壤基质势对彩椒生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 89-93.  
JIAO Yanping, ZHANG Yanhong, ZHAO Yong. Effect of soil matrix potential on sweet peppers growth and irrigation water use efficiency under mulched drip irrigation in solar greenhouses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 89-93.
- DE ALMEIDA A V R, DA SILVA A O, COSTA R N T, et al. Use of

- carnauba palm bagana to reduce water consumption in the production of irrigated radish[J]. *Revista Caatinga*, 2020, 33(4): 1 071-1 081.
- [18] NOMAN A, ALI Q, MAQSOOD J, et al. Deciphering physio-biochemical, yield, and nutritional quality attributes of water-stressed radish (*Raphanus sativus* L.) plants grown from Zn-Lys primed seeds[J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 175-189.
- [19] 刘彬听, 张桂琴, 陈显锋, 等. 利用电导率法测定 7 个品种(系)榛子枝条的抗寒性[J]. *林业科技*, 2017, 42(5): 25-27.
- LIU Binxin, ZHANG Guiqin, CHEN Xianfeng, et al. Determinations of cold-resistance for seven varieties(series)*Corylus heterophylla* shoots with electrical conductivity method[J]. *Forestry Science & Technology*, 2017, 42(5): 25-27.
- [20] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 不同灌水水平对日光温室萝卜产量及水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2007(6): 21-23, 27.
- LIU Hao, SUN Jingsheng, DUAN Aiwang, et al. Influence of different irrigation quantity on radish yield and water use efficiency in sunlight greenhouse[J]. *Water Saving Irrigation*, 2007(6): 21-23, 27.
- [21] BAI Shanshan, KANG Yaohu, WAN Shuqin. Winter wheat growth and water use under different drip irrigation regimes in the North China plain/winter wheat growth and water use under different drip irrigation regimes in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2020, 38: 321-335.
- [22] 韩海霞, 姚岭柏. 不同水肥互作处理对樱桃萝卜生长及产量的影响[J]. *北方园艺*, 2014(8): 17-21.
- HAN Haixia, YAO Lingbai. Effect of the different irrigation and fertilizer coupling treatment on growth and yield of the cherry radish[J]. *Northern Horticulture*, 2014(8): 17-21.
- [23] 冯志文, 万书勤, 康跃虎, 等. 沙地喷灌土壤基质势调控对土壤水分分布和马铃薯产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 8-16.
- FENG Zhiwen, WAN Shuqin, KANG Yuehu, et al. Using soil matric potential in sandy soil as an proxy for irrigation time in sprinkle irrigation of potato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 8-16.
- [24] HEGDE D M. Effect of soil matric potential, method of irrigation and nitrogen fertilization on yield, quality, nutrient uptake and water use of radish (*Raphanus sativus* L.)[J]. *Irrigation Science*, 1987, 8(1): 13-22.
- [25] 杨会颖, 刘海军, 李艳, 等. 膜下滴灌条件下土壤基质势对辣椒产量和水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 54-60.
- YANG Huiying, LIU Haijun, LI Yan, et al. Effects of soil matric potential on yield and water use efficiency of hot pepper under mulched drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 54-60.
- [26] 高彦婷, 张芮, 李红霞, 等. 水分胁迫对葡萄糖分及其蔗糖代谢酶活性的影响[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1 713-1 721.
- GAO Yanting, ZHANG Rui, LI Hongxia, et al. Effect of water stress on sugar accumulation and sucrose metabolism enzyme activities of greenhouse grape fruit[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1 713-1 721.
- [27] 范海燕, 潘兴瑶, 胡秀君, 等. 基于主成分分析的露地白萝卜滴灌施肥制度研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(S1): 87-93.
- FAN Haiyan, PAN Xingyao, HU Xiujun, et al. Study on drip irrigation and fertilization system of white radish in open field based on principal component analysis[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(S1): 87-93.
- [28] 路瑶瑶, 姚素梅, 孟丽, 等. 滴灌不同生育时期土壤基质势调控对春播红花生理特性和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(12): 36-43.
- LU Yaoyao, YAO Sumei, MENG Li, et al. Effects of different soil matric potential at different growth stages on physiological characteristics and yield of spring sown *Carthamus tinctorius* L. under drip irrigation condition[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(12): 36-43.

## Effects of Soil Water Regulation on Growth and Yield of Fruit Radish under Drip Irrigation in Greenhouse

CHEN Ke<sup>1</sup>, LIU Wenxin<sup>1</sup>, FENG Di<sup>1\*</sup>, ZHU Haiyan<sup>1</sup>, ZHANG Jingmin<sup>1</sup>,  
SANG Xiaoming<sup>2</sup>, DING Faqiang<sup>2</sup>, SUN Xiaolan<sup>1</sup>

(1. Weifang University of Science and Technology/ Key Laboratory of Facilities Horticulture of Universities in Shandong Province, Shouguang 262700, China; 2. Shouguang Agricultural and Rural Bureau, Shouguang 262700, China)

**Abstract:** 【Objective】 The fruit radish is a cash crop commonly cultivated in greenhouses in central and northern China. This study aims to determine the most effective drip irrigation schedule to enhance its yield while simultaneously increasing water use efficiency. 【Method】 The cultivar “Ice Cream” was used as the model plant. The irrigation was based on soil matric potential measured at the depth of 20cm in that whenever it dropped to -10 (T1), -20 (T2), -30 (T3), -40 (T4) or -50 kPa (T5), we irrigated the crops by 10mm of water. In each treatment, we measured the growth, yield and quality, as well as irrigation water use efficiency (*IWUE*) of the crop. 【Result】 The total irrigation amount for T1-T5 decreased from 120 to 70 mm. Reducing the soil matric potential threshold for irrigation resulted in reductions in area and fresh weight of leaves, root diameter and length, and weight of the radish, albeit the reduction in root length was not significant. Compared with T1, T2-T5 increased the yield by 2.2% to 44.0%, T2 increased *IWUE* by 17.3%, and T3-T5 reduced *IWUE* by 4.1% to 6.6%. With the decrease in the soil matric potential threshold, the soluble solid content and electrical conductivity of the radish both increased first followed by a decline, the soluble solid content peaked in T2 and Vc content increased monotonically. 【Conclusion】 Setting soil matric potential at depth of 20 cm at -20 kPa as the threshold and the irrigating 10 mm of water each time is optimal for improving the yield and *IWUE* of greenhouse fruit radish.

**Key words:** irrigation system; drip irrigation; radish; yield; irrigation water use efficiency

责任编辑：白芳芳