

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜产量和品质的影响

袁 泉^{1,2}, 卢 威², 王 君^{1*}, 陈 茹¹, 李衍素¹, 于贤昌¹,
贺超兴¹, 孙敏涛¹, 闫 妍¹

(1. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081; 2. 四川农业大学园艺学院, 成都 625014)

摘 要: 针对设施土壤栽培中缺乏简单实用灌溉策略的问题, 该研究以黄瓜‘中农 26’为试材, 在典型土壤质地(壤土、黏壤土和砂壤土)下, 控制同一质地土壤相同太阳辐射量累积下总灌水量一致, 探究基于太阳辐射累积量的灌溉策略(分别以 15、20 和 25 MJ/m² 的辐射累积量作为灌水起始点)对日光温室秋冬茬黄瓜植株生长、产量、灌溉水分利用效率和品质的影响。结果表明, 对于壤土、黏壤土和砂壤土, 以 25 MJ/m² 的辐射累积量作为灌水起始点, 分别对应单次 3.22、3.56 和 2.77 mm 的灌水量, 有利于植株获得更高的光合速率、叶面积、株高和节间数; 但同一质地土壤相同灌水量下基于太阳辐射累积量的灌溉策略并未对黄瓜产量和灌溉水分利用效率产生显著影响 ($P>0.05$)。对于壤土、黏壤土和砂壤土, 以 20 MJ/m² 的辐射累积量作为灌溉起始点, 分别对应单次 2.59、2.85 和 2.22 mm 的灌水量, 果实可获得较高的可溶性糖和维生素 C 含量, 较低的硝酸盐含量, 品质较优。因此, 基于太阳辐射累积量作为灌水起始点的灌溉策略可用于设施黄瓜栽培, 但单次灌水量需综合考虑土壤质地类型和高产/优质的栽培目标进行设定。

关键词: 温室; 灌溉; 土壤; 黄瓜; 太阳辐射累积量; 品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301123

中图分类号: S642.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0098-08

袁泉, 卢威, 王君, 等. 基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 98-105. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301123 <http://www.tcsae.org>

YUAN Quan, LU Wei, WANG Jun, et al. Effects of the irrigation strategies of accumulated solar radiation on cucumber yield and quality under different soil textures in the greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 98-105. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301123 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

设施栽培蔬菜已成为中国蔬菜稳定供应不可或缺的组成部分。制定合理的灌溉策略是提高蔬菜产量和品质的重要手段。目前关于设施蔬菜栽培灌溉策略的研究主要包括: 1) 通过构建数学模型估算作物蒸腾蒸发量来明确需水规律, 如改良的 FAO-56 彭曼公式^[1]、双作物系数模型^[2]等; 2) 通过传感器监测土壤水分状况来控制灌水起始点和灌水量, 如张力计^[3]、土壤水分传感器^[4]等; 3) 根据植株生长情况决策灌水起始点, 如表型^[5]、茎流^[6]、叶温^[7]等; 4) 其他用作灌溉依据的方法, 如蒸发皿法^[8]、称重法^[9]等。以上方法各有优点, 但附加的田间取样工作、复杂的土壤微环境、传感器长期缺乏维护引起的准确性和稳定性降低等各种原因, 导致其在实际生产过程

中并没有获得广泛的应用。目前绝大部分生产者仍是根据田间经验进行粗放式管理, 极易造成一次性灌水过量, 导致土壤水分渗漏及养分淋溶, 同时迫使植株遭受水分充足、亏缺、复水恢复一系列波动的土壤水分状况, 若浇水不及时还会造成短时干旱胁迫。

设施土壤中水分来源主要是灌溉水和地下水, 水分去向主要包括土壤中水分下渗、土壤本身水分含量变化、土壤蒸发和植物蒸腾^[8]。通过控制灌水量可有效避免灌水过量, 减少水分下渗。而土壤蒸发和植物蒸腾受设施内小气候环境的影响^[1]。在众多环境因子中, 光照是影响植物蒸腾和土壤蒸发的重要环境因子, 也是能够极易准确、稳定监测的环境因子。为简化灌水控制策略, 很多研究重点关注太阳辐射累积量与植物需水规律、土壤/基质蒸发量的关系^[10], 已证实太阳辐射累积量与温室作物耗水量之间呈显著正相关^[11-13]。基于辐射累积量的灌溉策略控制逻辑简单, 多用于持水能力较差的设施基质栽培, 但对于不同类型基质, 推荐的太阳辐射累积量设定值也存在较大差异^[13-14], 并不能直接用于土壤栽培。中国蔬菜设施仍以土壤栽培为主, 若能明确适合土壤栽培的太阳辐射累积量设定值, 将可以大幅降低设施规模化生产中的灌溉控制成本和劳动力投入。

蔬菜栽培设施主要分布在黄淮海及环渤海、西北及

收稿日期: 2023-01-30 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1001903); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-01); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-IVFCAAS); 农业农村部园艺作物生物学与种质创制重点实验室项目

作者简介: 袁泉, 研究方向为蔬菜栽培与生理学。

E-mail: yuanquan2917@163.com

※通信作者: 王君, 博士, 助理研究员, 研究方向为蔬菜栽培与生理学。

E-mail: wangjun01@caas.cn

长江中下游等地区，各地区土壤质地差异明显，其中，以壤土、黏壤土和砂壤土较为适宜。黄瓜是中国设施栽培面积最大的蔬菜之一，对土壤水分较为敏感^[15-17]。基于此，本文确定在壤土、黏壤土和砂壤土 3 种典型土壤质地下，研究基于太阳辐射累积量的灌溉策略对日光温室黄瓜植株生长、产量、灌溉水分利用效率和品质的影响，以期为不同质地土壤下设施黄瓜高产或优质栽培提供简单实用的灌溉策略。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验在北京市昌平区南口镇中国农科院南口中试基地的日光温室（116°6'E，40°13'N）中进行。温室长 100 m，跨度 8 m，前屋面为防水无滴膜覆盖，后墙为砖墙。供试材料为黄瓜‘中农 26’（中蔬种业科技（北京）有限公司）。

1.2 试验设计

试验设置 3 种质地的土壤，分别为壤土（R）、黏壤土（N）和砂壤土（S），物理性质详见表 1。灌溉控

制逻辑是当太阳辐射累积量累计至设定值时开始灌溉，同时控制系统中太阳辐射累积量数值清零，重新开始累计，一直循环执行。为获得设施黄瓜高产，推荐控制结果期土壤含水率维持在田间持水量的 70%~90%^[18-19]。在此基础上，开展了不同质地土壤下以田间持水量的 70% 作为灌水下限、田间持水量的 90% 作为灌水上限对温室黄瓜产量和品质影响的预试验，统计不同质地土壤下相邻两次灌水之间植株冠层处太阳辐射累积值，发现变化范围为 15~25 MJ/m²。故本试验在同一质地土壤下设计了 15、20 和 25 MJ/m² 共 3 个辐射累积量梯度。因此，设置 R₁₅、R₂₀、R₂₅、N₁₅、N₂₀、N₂₅、S₁₅、S₂₀、S₂₅ 共 9 个处理。各处理单次灌水量详见表 2，具体计算如下：

$$I = Q_{FC} \cdot B_D \cdot s \cdot h \cdot (90\% - 70\%) \times 1000 \tag{1}$$

式中 I 为以 25 MJ/m² 作为灌水起始点时单次灌水量，mm； Q_{FC} 为田间持水量，%； B_D 为土壤容重，g/cm³； s 为计划湿润面积，取值为 0.071 m²； h 为计划湿润深度，取值为 0.24 m。为保持同一质地土壤下累积相同太阳辐射量时各处理的总灌水量一致，以 15、20 MJ/m² 作为灌水起始点时对应单次灌水量分别为 0.6 I 、0.8 I 。

表 1 试验土壤的物理性质
Table 1 Soil physical characteristics

土壤质地 Soil textures	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity /%	颗粒组成 Particle composition /%		
			黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.050 mm)	砂粒 Sand (>0.050~2.000 mm)
壤土 Loam	1.31	28.1	19.7	33.1	47.2
黏壤土 Clay loam	1.22	33.4	38.2	25.0	36.8
砂壤土 Sandy loam	1.38	22.9	16.3	18.1	65.6

表 2 各处理单次灌水量

Table 2 Each irrigation amount of all treatments mm								
壤土 Loam			黏壤土 Clay loam			砂壤土 Sandy loam		
R ₁₅	R ₂₀	R ₂₅	N ₁₅	N ₂₀	N ₂₅	S ₁₅	S ₂₀	S ₂₅
1.95	2.59	3.22	2.14	2.85	3.56	1.67	2.22	2.77

注：处理中下标数字 15、20 和 25 分别代表以 15、20 和 25 MJ·m⁻² 的太阳辐射累积量作为灌水起始点。
Note: The subscript numerals (15, 20, and 25) in the description of treatments represent the irrigation starting points when accumulated solar radiations reached up to the setting values (15, 20, and 25 MJ·m⁻²).

试验于 2021 年 8 月 2 日催芽，3 日播种。采用盆栽，规格为 30 cm×30 cm（直径×高度），8 月 20 日将黄瓜幼苗定植，单行栽培，每行种植 17 株。行间距为 1.3 m，株间距为 0.3 m，栽培密度为 2.57 株/m²。试验为随机区组设计，每处理 3 个重复，每个小区面积 6.6 m²（宽 1.3 m×长 5.1 m）。根据黄瓜的生育特点，将生长期划分为苗期（8 月 21 日—9 月 30 日）、初花期（10 月 1 日—10 月 10 日）和结瓜期（10 月 11 日—12 月 23 日）。采用压力补偿式滴灌管进行灌溉，每行布置一根，相邻滴头间距为 30 cm，流量为 1.6 L/h。为保证幼苗成活，定植后同一质地土壤灌溉同量的定植水和缓苗水。开始不同灌溉策略处理的时间为 10 月 11 日，拉秧时间为 12 月 24 日。整个生育期 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别施用 337.5、246.0 和 472.5 kg/hm²。各处理的其他栽培管理措施均保持一致。

1.3 测定方法

1.3.1 环境数据监测和灌水量测定

在试验区中心区域，距植株冠层位置高 20 cm 处

安装太阳辐射传感器（ZZ-LRS-TSR-485 光电式，北京棠华科技有限公司）和温湿度计（RC-4HA/C，精度：温度为 0.1℃，湿度为 3% RH，江苏精创电气股份有限公司），传感器位置随着植株生长不断调整。每个处理安装了 1 台数字水表（SM-10，精度 0.000 01 m³，南京水门电子有限公司）在线记录灌水量。所有数据均每 5 min 记录 1 次。

1.3.2 植株生长指标测定

各处理随机选择至少 3 株，在晴天 08:30—11:30，采用 CIRAS-3 便携式光合仪（PP System，美国）对从上往下数第 6 片功能叶的光合速率进行测定，测定条件为：光强 800 μmol/(m²·s)，CO₂ 浓度 400 μmol/mol。随机选择至少 6 株，从上往下数第 7 至第 9 片叶，对其叶面积进行测定求和，对第 7 至第 9 节的节间距进行测定取平均，测定日期为 2021 年 10 月 14 日和 11 月 22 日。采用氯化三苯基四氮唑法测定根系活力^[20]，取样日期为 12 月 1 日。在拉秧前测定株高和节间数，测定日期为 12 月 23 日。

1.3.3 产量和灌溉水分利用效率

开始不同灌水策略处理后，每行标记 7 株植株对其产量进行统计。灌溉水分利用效率计算为

$$I_{WUE} = Y/(I_{total}/1000) \tag{2}$$

式中 I_{WUE} 为灌溉水分利用效率，kg/m³； Y 为单位面积产量，kg/m²； I_{total} 为总灌水量，mm。

1.3.4 品质测定

于 2021 年 10 月 27 日选取同日开花节位作标记，

11月5日摘瓜用于品质测定。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;维生素 C 含量采用 2,6-2 氯酚靛酚比色法测定;硝酸盐含量采用水杨酸-浓硫酸比色法测定^[20]。

1.3.5 数据分析

采用 SPSS 19 统计分析软件 (version 19.0, IBM, USA) 进行方差分析,多重比较采用 Tukey 检验。

2 结果与分析

2.1 温室内主要气象因子变化

饱和水汽压差 (vapor pressure deficit, VPD) 是综合反映空气湿度的指标。从图 1 可以看出,植株冠层太阳辐射日累积量变化范围为 0.18~11.87 MJ/(m²·d),白天 VPD 平均值变化范围为 0.11~3.75 kPa, VPD 与太阳辐射日累积量的变化趋势基本一致。

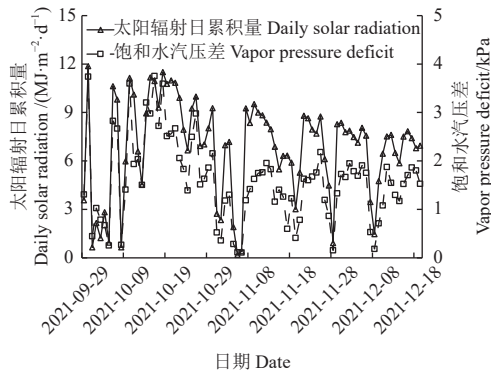


图 1 温室内太阳辐射日累积量和白天饱和水汽压差平均值
Fig.1 Daily solar radiation and average vapor pressure deficit (VPD) during daytime in the greenhouse

不同地域光照条件存在明显差异,而进入温室的太阳辐射量会影响内部温、热环境,从而影响作物生长

表 3 不同灌溉策略下温室秋冬茬黄瓜光合速率、叶面积和节间距

Table 3 Photosynthetic rate, leaf area and internodal distance of autumn-winter cucumber under the different irrigation strategies in the greenhouse

处理 Treatments		2021-10-14			2021-11-22		
		光合速率 Photosynthetic rate / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶面积 Leaf area / cm^2	节间距 Internodal distance / cm	光合速率 Photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶面积 Leaf area / cm^2	节间距 Internodal distance / cm
壤土 Loam	R ₁₅	13.1ab	863.6bcd	10.9cd	21.4a	790.7 d	10.5e
	R ₂₀	13.4ab	1061.3a	13.3a	18.6ab	877.1bc	12.4c
	R ₂₅	17.4a	1137.1a	12.6ab	19.1ab	1047.9a	13.7a
黏壤土 Clay loam	N ₁₅	11.8ab	781.1 d	9.4e	15.5b	801.0 d	11.3 d
	N ₂₀	16.0ab	837.2cd	11.2cd	16.4ab	847.3cd	12.5c
	N ₂₅	18.7a	838.9cd	10.8 d	19.5ab	902.6b	13.0b
砂壤土 Sandy loam	S ₁₅	8.1b	910.6bc	12.0bc	19.7ab	732.4e	10.1e
	S ₂₀	15.0ab	807.2 d	12.0bcd	18.5ab	814.6 d	11.3 d
	S ₂₅	15.3ab	939.2b	13.2a	17.6ab	841.1cd	11.6 d
质地 Soil texture (S)		ns	**	**	ns	**	**
灌水 Irrigation (I)		**	**	**	ns	**	**
质地×灌水 (S×I)		**	**	**	*	**	**

注:每列不同小写字母表示各处理之间差异显著 ($P<0.05$); **表示各处理间存在极显著差异 ($P<0.01$); *表示各处理间存在显著差异 ($P<0.05$); ns 表示各处理间无显著差异。下同。
Note: Different lowercase letters in each column indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). ** indicates extremely significant difference among different treatments ($P<0.01$); * indicates significant difference among different treatments ($P<0.05$); ns indicates no significant difference among different treatments. The same below.

土壤质地和基于辐射累积量的灌溉策略二者均对黄瓜植株的叶面积和节间距产生了显著影响。对于壤土、黏壤土和砂壤土, R₂₅、N₂₅ 和 S₂₅ 处理下叶面积和节间距

发育和产量积累。由图 2 可知, 试验期间温室内气温变化范围为 7.5~44.4℃, 气温平均值变化范围为 11.5~25.6℃。秋冬季节设施蔬菜常会遭受低温弱光的逆境胁迫, 温室内气温若低于 12℃ 则会导致黄瓜生理代谢活动严重失调^[21]。夜间低于 12℃ 的天数统计有 35 d, 除了 11 月 6 日至 9 日连续 4 d 外, 其他低温天气主要出现在拉秧前 30 d。

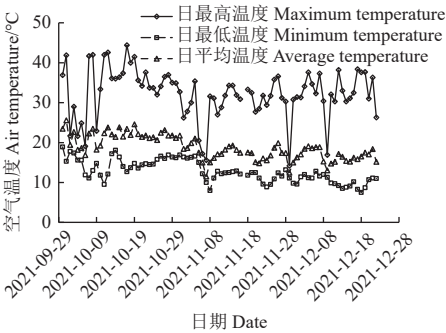


图 2 温室内最高、最低和平均空气温度日变化
Fig.2 Diurnal variation of maximum, minimum and average air temperatures in the greenhouse

2.2 光合速率、叶面积和节间距

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜植株光合速率、叶面积和节间距的影响如表 3 所示。分析光合速率 2 次的测定结果, 土壤质地对叶片光合速率没有产生显著影响 ($P>0.05$)。而在结瓜初期 (10 月 14 日) 不同灌溉策略对光合速率产生了显著影响, 以 25 MJ/m² 作为灌水起始点时叶片光合速率最大, 以 20 MJ/m² 作为灌水起始点次之, 以 15 MJ/m² 作为灌水起始点时最小。在结瓜盛期 (11 月 22 日) 不同灌溉策略未对光合速率产生显著影响 ($P>0.05$)。在整个结瓜期土壤质地和灌溉策略交互对光合速率产生了显著影响 ($P<0.05$)。

分别在同一质地处理中数值较大, 而以 R₁₅、N₁₅ 和 S₁₅ 处理下叶面积和节间距最小, 表明不论哪种土壤质地, 以 25 MJ/m² 作为灌水起始点有利于黄瓜植株生长。

比较 R_{25} 、 N_{25} 和 S_{25} ，发现 R_{25} 处理下叶面积比 N_{25} 、 S_{25} 分别高 16.1%~35.6%、21.1%~24.6%； R_{25} 处理下节间距比 N_{25} 、 S_{25} 分别高 5.4%~16.3%、-4.8%~18.1%（10 月 14 日数据 R_{25} 和 S_{25} 处理间无显著差异， $P>0.05$ ），表明以 25 MJ/m^2 作为灌水起始点时壤土较黏壤土和砂壤土更有利于黄瓜植株叶片伸展。

2.3 株高和节间数

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜植株株高的影响如图 3a 所示。对于壤土、黏壤土和砂壤土， R_{25} 、 N_{25} 和 S_{25} 处理下植株株高在同一土壤质地处理中数值最大。对于壤土， R_{25} 处理下株高较 R_{15} 和 R_{20} 分别高 32.2% 和 22.2%；对于黏壤土， N_{25} 处理下株高较 N_{15} 和 N_{20} 分别高 24.7% 和 20.1%；对于砂壤土， S_{25} 处理下株高较 S_{15} 和 S_{20} 分别高 23.4% 和 30.9%。在相同的灌溉策略下，在以 15 MJ/m^2 作为灌水起始点时，3 种土壤质地植株株高无显著差异（ $P>0.05$ ）。在以 20 MJ/m^2 作为灌水起始点时，壤土和黏壤土下植株株高略高于砂壤土；在以 25 MJ/m^2 作为灌水起始点时，壤土下植株株高显著高于砂壤土（ $P<0.05$ ）。

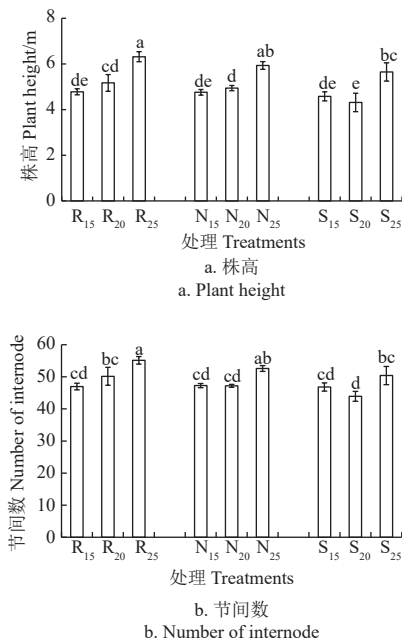


图 3 不同灌溉策略下日光温室秋冬茬黄瓜株高及节间数
Fig.3 Plant height and number of internode of autumn-winter cucumber under the different irrigation strategies in the greenhouse

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜植株节间数的影响如图 3b 所示。对于壤土、黏壤土和砂壤土， R_{25} 、 N_{25} 和 S_{25} 处理下植株节间数在同一土壤质地处理中数值最大。对于壤土， R_{25} 处理下节间数较 R_{15} 和 R_{20} 分别高 17.4% 和 9.9%；对于黏壤土， N_{25} 处理下节间数较 N_{15} 和 N_{20} 分别高 11.2% 和 11.4%；对于砂壤土， S_{25} 处理下节间数较 S_{15} 和 S_{20} 分别高 7.7% 和 14.8%。在相同的灌溉策略下，以 20、 25 MJ/m^2 作为灌水起始点时，壤土和黏壤土下植株节间数略高于砂壤土。

2.4 根系活力

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜植株根系活力的影响如图 4 所示。对于壤土， R_{25} 处理下根系活力较 R_{15} 和 R_{20} 分别高 35.9% 和 46.3%；对于黏壤土， N_{25} 和 N_{20} 处理下根系活力分别比 N_{15} 高 28.1% 和 35.0%；对于砂壤土， S_{25} 处理下根系活力比 S_{15} 和 S_{20} 分别低 14.2% 和 26.8%。在相同的灌溉策略下，以 15 MJ/m^2 作为灌水起始点时，砂壤土下植株根系活力显著高于黏壤土和壤土（ $P>0.05$ ）；以 20 MJ/m^2 作为灌水起始点时，砂壤土下植株根系活力最大，黏壤土次之，壤土最低；而以 25 MJ/m^2 作为灌水起始点时，3 种土壤质地植株根系活力无显著差异（ $P>0.05$ ）。以上结果表明土壤质地和灌溉策略交互会影响黄瓜植株的根系活力，其中，砂壤土更有利于提高根系活力。

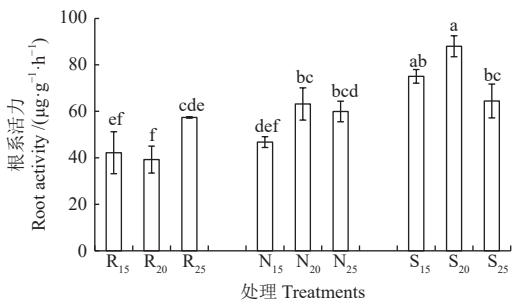


图 4 不同灌溉策略下日光温室秋冬茬黄瓜根系活力
Fig.4 Root activity of autumn-winter cucumber under the different irrigation strategies in the greenhouse

2.5 坐瓜数、产量和灌溉水分利用效率

在本试验设计中，相同设施光环境下，同一质地土壤累积相同的太阳辐射量时各处理总灌水量基本保持一致。对于壤土、黏壤土和砂壤土，各处理间坐瓜数、总产量以及灌溉水分利用效率均无显著差异（ $P>0.05$ ，表 4）。

表 4 不同灌溉策略下温室秋冬茬黄瓜坐瓜数、产量和灌溉水分利用效率						
Table 4 Number of cucumber, yield and irrigation water use efficiency of autumn-winter cucumber under the different irrigation strategies in the greenhouse						
处理 Treatments	坐瓜数 Number of cucumber/ (千条·hm ⁻²)	产量 Yield/(t·hm ⁻²)			灌溉水分利用效率 Irrigation water use efficiency/(kg·m ⁻³)	
		2021-10-04—2021-10-17	2021-10-18—2021-11-24	2021-11-25—2021-12-24		
壤土 Loam	R ₁₅	186.9a	8.35	18.27	12.96	17.6a
	R ₂₀	229.7a	7.30	25.28	17.21	23.9a
	R ₂₅	201.6a	1.81	29.16	17.39	24.6a
黏壤土 Clay loam	N ₁₅	208.9a	7.70	19.99	18.17	22.2a
	N ₂₀	225.4a	5.61	24.67	15.71	21.5a
	N ₂₅	234.5a	7.57	26.30	18.58	24.3a
砂壤土 Sandy loam	S ₁₅	213.2a	4.09	26.84	13.64	21.3a
	S ₂₀	223.8a	7.30	25.95	14.86	23.9a
	S ₂₅	205.2a	7.26	23.51	14.24	22.1a

2.6 品质

基于辐射累积量的灌溉策略对不同土壤质地温室黄瓜品质的影响如表 5 所示。对于可溶性蛋白, 在壤土、黏壤土和砂壤土下, 各水分处理间无显著差异 ($P>0.05$)。对于可溶性糖, 壤土下 R_{15} 处理最高; 而黏壤土和砂壤土下, 以 15、20 MJ/m² 作为灌水起始点时可溶性糖含

量较高, 且二者无显著差异 ($P>0.05$)。对于维生素 C, 在壤土、黏壤土和砂壤土下, 均以 20、25 MJ/m² 作为灌水起始点时维生素 C 含量较高, 且二者无显著差异 ($P>0.05$)。对于硝酸盐, 在壤土和黏壤土下, 均以 20、25 MJ/m² 作为灌水起始点时硝酸盐含量较低, 且二者无显著差异 ($P>0.05$); 在砂壤土下, S_{15} 和 S_{20} 处理下硝酸盐含量较低。

表 5 不同灌溉策略下温室秋冬茬黄瓜品质

Table 5 Fruit quality of autumn-winter cucumber under the different irrigation strategies in the greenhouse

处理 Treatments		可溶性蛋白含量 Soluble protein content / (mg g ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content / %	维生素 C 含量 Vitamin C content / (mg·100 g ⁻¹)	硝酸盐含量 Nitrate content / (μg g ⁻¹)
壤土 Loam	R_{15}	1.06a	9.3a	268.1c	94.9a
	R_{20}	1.39a	5.2d	290.7a	65.8bcd
	R_{25}	1.27a	6.3cd	291.0a	57.1bcd
黏壤土 Clay loam	N_{15}	1.05a	6.7bcd	255.1c	82.3ab
	N_{20}	1.31a	8.0abc	295.7a	56.1bcd
	N_{25}	1.04a	4.7d	302.0a	59.7bcd
砂壤土 Sandy loam	S_{15}	1.01a	7.8abc	271.3bc	46.1d
	S_{20}	1.28a	8.6ab	297.4a	54.8cd
	S_{25}	1.03a	5.0d	289.5ab	74.3abc
质地 Soil texture (S)		ns	ns	ns	*
灌水 Irrigation (I)		*	**	**	**
质地×灌水 ($S\times I$)		ns	**	*	**

3 讨论

3.1 土壤质地和灌溉策略交互对黄瓜产量的影响

黄瓜是喜水且受灌水量影响较大的蔬菜, 增加灌水量能够显著提高黄瓜产量^[15]。本试验中同一质地土壤下基本一致的灌水总量可能是导致各水分处理间黄瓜产量无显著差异的主要原因。在结瓜期开始水分处理, 基于辐射累积量的灌溉策略产生了“高频少量”和“低频多量”的灌溉效果。以 15、20 和 25 MJ/m² 作为灌水起始点引起的总灌水次数分别为 21、26 和 35。但产量并未受灌溉频率的影响, 与前人研究关于黄瓜产量不受灌水频率影响的结果一致^[22-23]。但也有报道称相同灌水量下增加灌水频率会造成减产^[24-25] 或增产^[26] 等不同的结果, 推测研究结果产生差异的原因是由灌水量、温光条件和茬口不同共同引起的。无论壤土、黏壤土, 还是砂壤土, 在低频多量的灌溉策略 (以 25 MJ/m² 作为灌水起始点) 下黄瓜植株光合速率、叶面积、株高和节间数高于其他灌水处理 (表 3、图 3), 有利于黄瓜结瓜期植株生长。

3.2 土壤质地和灌溉策略交互对灌水量和水分利用效率的影响

由于以 25 MJ/m² 作为灌水起始点时黄瓜植株长势较优, 统计试验期间植株冠层太阳辐射量发现, 达到 25 MJ/m² 累积值对应需 2~5 d, 不同质地土壤单次灌溉量为 2.77~3.56 mm。杨冬艳等^[25] 推荐宁夏日光温室秋冬茬黄瓜结瓜期灌水间隔为 7 d, 灌水量为 10.5 mm。王艳等^[26] 推荐天津滨海日光温室春茬黄瓜灌水定额 12 mm, 灌水间隔为 3 d, I_{WUE} 为 25.7 kg/m³。毋海梅等^[27] 推荐以 20 cm 标准蒸发皿的累积水面蒸发量作为灌水依据, 获得玻璃温室秋冬茬黄瓜生长中期蒸发蒸腾量为 2.47~3.85 mm/d, 平均灌水间隔为 4~5 d, I_{WUE} 为 32.5 kg/m³。比较折算后的日平均灌水量, 发现本试验的数值大小在

其他研究结果的范围之内。但本试验栽培密度是实际生产中的近 1/2, 导致产量和 I_{WUE} 明显低于其他研究。同时, 试验期间由于 11 月 6 日开始连续 4 d 出现了夜间低于 12 ℃ 的环境温度, 白天最高温度 15.6~20.5 ℃ 范围内, 连续的低温弱光天气导致各处理黄瓜产量有所减少。11 月 20 日至拉秧 (12 月 24 日) 期间, 随着日平均气温整体降低, 收获间隔时间也由之前的 2~3 d 延长至 4~5 d, 进一步导致 I_{WUE} 降低。

3.3 土壤质地和灌溉策略交互对黄瓜品质的影响

在相同的土壤质地下, 虽然整体灌水量保持一致, 但高频少量的灌溉策略容易造成土壤湿润面积小, 受太阳辐射直接照射影响会增加表面无效蒸发, 植株实际获取到的水分可能会有所减少, 尽管试验处理未对产量产生影响, 但植株生长确实受到了影响, 以 25 MJ/m² 辐射累积量作为灌水起始点处理下长势最优 (表 3)。因此, 推测以 15、20 MJ/m² 作为灌水起始点的处理下植株实际获取的水量可能有所减少。而灌水量减少会降低水分从木质部向果实的运输, 提高果实可溶性糖含量^[28]。故在以 15、20 MJ/m² 作为灌水起始点的处理下果实可溶性糖含量略高于以 25 MJ/m² 作为灌水起始点的处理。土壤质地并没有对维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白含量产生显著影响, 而基于辐射累积量的灌溉策略则对各指标影响显著, 以 20 MJ/m² 作为灌水起始点的处理下果实可溶性糖和维生素 C 含量最高, 硝酸盐含量最低, 品质最优 (表 5), 表明相同灌水量下通过优化灌溉频率可以改善果实品质。

4 结论

为简化设施灌溉策略, 本研究探讨了基于太阳辐射累积量作为灌水起始点的灌溉策略对黄瓜植株生长、产量和品质的影响, 明确了典型土壤质地 (壤土、黏壤土

和砂壤土)下温室秋冬茬黄瓜栽培的灌溉参数,得出以下结论:

1) 在栽培密度为 2.57 株/m² 下,对于壤土、黏壤土和砂壤土下温室秋冬茬黄瓜栽培,以 25 MJ/m² 的太阳辐射累积量作为灌水起始点,分别对应单次 3.22、3.56 和 2.77 mm 的灌水量,有利于植株获得更大的光合速率、叶面积、株高和节间数,可以作为日光温室秋冬茬黄瓜结瓜期的灌溉参数。但同一质地土壤相同总灌溉量下基于辐射累积量的灌溉策略并未对产量产生显著影响。

2) 对于壤土、黏壤土和砂壤土下温室秋冬茬黄瓜优质栽培,建议设置以 20 MJ/m² 的太阳辐射累积量作为灌水起始点,分别对应单次 2.59、2.85 和 2.22 mm 的灌水量作为灌水参数。

在后续研究中,还需对不同地区的设施、蔬菜种类、栽培茬口以及实际栽培密度下的应用效果进行验证,通过适当调整灌溉参数不断优化设施灌溉控制策略。

[参 考 文 献]

- [1] 孙一鑫, 马乐乐, 苗丽丽, 等. 基于光辐射时滞效应的温室番茄蒸腾量模型的构建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 2-11.
SUN Yixin, MA Lele, MIAO Lili, et al. Construction of tomato transpiration model in greenhouse based on time-lag effect of light radiation[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(2): 2-11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 117-125.
YAN Haofang, WU Haimei, ZHANG Chuan, et al. Estimation of greenhouse cucumber evapotranspiration in different seasons based on modified dual crop coefficient model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 117-125. (in Chinese with English abstract)
- [3] 龙怀玉, 武雪萍, 张淑香, 等. 作物主动吸水技术内涵与研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 139-152.
LONG Huaiyu, WU Xueping, ZHANG Shuxiang, et al. Connotation and research progress of crop initiate water drawing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 139-152. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李若楠, 黄绍文, 史建硕, 等. 日光温室冬春茬黄瓜滴灌的肥水优化管理[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3648-3660.
LI Ruonan, HUANG Shaowen, SHI Jianshuo, et al. Optimization management of water and fertilization for winter-spring cucumber under greenhouse drip irrigation condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(20): 3648-3660. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵奇慧, 李莉, 张淼, 等. 基于迁移学习的温室番茄叶片水分胁迫诊断方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(Supp.1): 340-347,356.
ZHAO Qihui, LI Li, ZHANG Miao, et al. Water stress diagnosis algorithm of greenhouse tomato based on fine-tuning learning[J]. Transaction of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 340-347,356. (in Chinese with English abstract)
- [6] 葛建坤, 辛清聪, 龚雪文, 等. 温室通风控水条件对番茄耗水特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 204-213.
GE Jiankun, XIN Qingcong, GONG Xuewen, et al. Effects of greenhouse ventilation and water control conditions on water consumption characteristics and yield of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(15): 204-213. (in Chinese with English abstract)
- [7] ABRAHAM N, HEMA P, SARITHA E, et al. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(2): 145-157.
- [8] 毋海梅, 闫浩芳, 张川, 等. 温室滴灌黄瓜产量和水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 84-93.
WU Haimei, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Responses of yield and water use efficiency of drip-irrigated cucumber in greenhouse to water stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(9): 84-93. (in Chinese with English abstract)
- [9] 任瑞丹, 范兵华, 王归鹏, 等. 称重法决策灌溉量对袋式栽培甜瓜茎流与养分吸收及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 81-89.
REN Ruidan, FAN Binghua, WANG Guipeng, et al. Effects of irrigation amounts by weighting method on stem flow and nutrient absorption of melon in substrate bag culture[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(12): 81-89. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙少坤. 基于实时重量的日光温室袋培番茄生长及其需水量模型研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
SUN Shaokun. Research on the Growth and Water Demand Model of Bag-grown Tomato in Solar Greenhouse Based on Real-time Weight [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐立鸿, 肖康俊, 蔚瑞华. 基于温室环境和作物生长的番茄基质栽培灌溉模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 189-196.
XU Lihong, XIAO Kangjun, WEI Ruihua. Irrigation models for the tomatoes cultivated in organic substrate based on greenhouse environment and crop growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 189-196. (in Chinese with English abstract)
- [12] 冀健红, 刘新阳. 温室番茄植株蒸腾变化规律及主要影响

- 因素研究[J]. 节水灌溉, 2020(8): 40-43,49.
- JI Jianhong, LIU Xinyang. A study on transpiration variation law and its main influencing factors of tomato grown in a solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 40-43,49. (in Chinese with English abstract)
- [13] 岳焕芳, 程明, 徐厚成, 等. 椰糠栽培番茄耗水量与气象因子相关性研究[J]. 节水灌溉, 2017(12): 48-51.
- YUE Huanfang, CHENG Ming, XU Houcheng, et al. Correlation between water consumption of tomato under coconut coir cultivation condition and meteorological factors[J]. Water Saving Irrigation, 2017(12): 48-51. (in Chinese with English abstract)
- [14] 许艺, 李新旭, 杨哲, 等. 我国连栋玻璃温室番茄长季节栽培产量与荷兰存在差距的原因分析[J]. 中国蔬菜, 2020, 1(10): 1-8.
- XU Yi, LI Xinxu, YANG Zhe, et al. Analysis on the reasons for the gap between my country's multi-span glass greenhouse tomato long-season cultivation yield and the Netherlands[J]. China Vegetables, 2020, 1(10): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [15] 冀健红, 张晔, 李艳丽, 等. 不同灌水量和灌水频率对田间黄瓜耗水特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 63-69.
- JI Jianhong, ZHANG Ye, LI Yanli, et al. Effects of irrigation amount and frequency on water consumption and yield of field cucumber[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吕剑, 金宁, 郁继华, 等. 基质栽培黄瓜生长、产量及品质对不同灌水下限的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 107-115.
- LV Jian, JIN Ning, YU Jihua, et al. Analysis on the reasons for the gap between my country's multi-span glass greenhouse tomato long-season cultivation yield and the Netherlands[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 107-115. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张泽锦, 王力明, 唐丽, 等. 滴灌水量对设施土壤养分分布和黄瓜养分吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 72-78.
- ZHANG Zejin, WANG Liming, TANG Li, et al. Improving nutrient use efficiency in facility production of cucumber by regulating drip irrigation amount[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 72-78. (in Chinese with English abstract)
- [18] 廖凯, 范兴科. 基于水分上限的灌溉控制对黄瓜水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 54-56, 60.
- LIAO Kai, FAN Xingke. The effect of controlling irrigation maximum on water use efficiency of cucumber[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 54-56, 60. (in Chinese with English abstract)
- [19] 贺忠群, 邹志荣. 黄瓜结果期灌水上限的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 3(1): 84-88.
- HE Zhongqun, ZOU Zhirong. Research on the up limitation of irrigation for cucumber during fruit-set period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 3(1): 84-88. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
- [21] 周双. 黄瓜种质资源耐低温性评价及分子标记[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- ZHOU Shuang. Germplasm Evaluation and Molecular Markers of Chilling Tolerance in Cucumber[D]. Harbin: Northeast Agricultural University; 2015. (in Chinese with English abstract)
- [22] ÇAKIR R, KANBUROGLU-ÇEBİ U, ALTINTAS S, et al. Irrigation scheduling and water use efficiency of cucumber grown as a spring-summer cycle crop in solar greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 78-87.
- [23] NIKOLAOU G, NEOCLEOUS D, KATSOULAS N, et al. Effect of irrigation frequency on growth and production of a cucumber crop under soilless culture[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2017, 29(11): 863-871.
- [24] 摆虹霞, 张亚红, 马小连, 等. 灌水频率和灌水量对温室黄瓜产量、品质及灌溉水利用效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(9): 2136-2146.
- BAI Hongxia, ZHANG Yahong, MA Xiaolian, et al. Effects of irrigation frequency and irrigation amount on yield, quality and irrigation water use efficiency of greenhouse cucumber[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(9): 2136-2146. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨冬艳, 冯海萍, 赵云霞, 等. 日光温室秋冬茬黄瓜结果期灌溉频率对产量及根系分布特征的影响[J]. 节水灌溉, 2020(6): 20-23.
- YANG Dongyan, FENG Haiping, ZHAO Yunxia, et al. Effects of irrigation frequency on yield and root distribution characteristics of greenhouse autumn-winter planted cucumber[J]. Water Saving Irrigation, 2020(6): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王艳, 梁新书, 廉晓娟, 等. 滨海地区日光温室黄瓜滴灌灌溉指标研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(Supp.1): 47-50.
- WANG Yan, LIANG Xinshu, LIAN Xiaojuan, et al. Study on drip irrigation scheduling of cucumber under solar greenhouse in coastal area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(Supp.1): 47-50. (in Chinese with English abstract)
- [27] 毋海梅. 温室黄瓜耗水模型及高效灌水指标的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- WU Haimei. Study on Cucumber Water Consumption Model and Efficient Irrigation Index of Greenhouse Conditions[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵文举, 马锋, 曹伟, 等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 95-101.
- ZHAO Wenju, MA Feng, CAO Wei, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 95-101. (in Chinese with English abstract)

Effects of the irrigation strategies of accumulated solar radiation on cucumber yield and quality under different soil textures in the greenhouse

YUAN Quan^{1,2}, LU Wei², WANG Jun^{1*}, CHEN Ru¹, LI Yansu¹, YU Xianchang¹,
HE Chaoxing¹, SUN Mintao¹, YAN Yan¹

(1. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 625014, China)

Abstract: Water resource is very deficient in the world. Agricultural water consumption is accounted for a large proportion of the total. Especially, high consumption can be found in the protected cultivation of vegetables, due to the great scale and multiple cropping index. Hence, it is urgent to develop water-saving irrigation for protected cultivation. However, simple and practical technology is still lacking in practical production. In this study, three typical soil textures (loam, clay loam, and sandy loam) were adopted for vegetable cultivation. Cucumber was selected as the experimental material, because of its wide cultivation areas. A field experiment was carried out from 2021-08-02 to 2021-12-24 in the Chinese solar greenhouse in Beijing, China. Cultivation density was set as 2.57 plants per square meter. Three irrigation treatments for each soil texture were performed from the fruiting period in the form of drip irrigation. The accumulated solar radiation reached up to the setting value (15, 20, 25 MJ/m²), corresponding to the onset of the irrigation system. The data logger was reset and recounted in the control system. There was consistency in the total irrigation amount under the same accumulation of solar radiation for each soil texture. A systematic investigation was made to explore the effects of different irrigation strategies on the growth and quality of autumn-winter cucumber under the above soil textures. The average air temperature varied from 11.5 to 25.6 °C during this experiment. There were 35 days below 12 °C during nighttime. The daily solar radiation on the plant canopy varied from 0.18 to 11.87 MJ/(m²·d). Meanwhile, the average water vapor deficit during the daytime varied from 0.11 to 3.75 kPa. Results showed that the irrigation strategies with different accumulated solar radiations caused the ‘high frequency and low irrigation amount’ and ‘low frequency and high irrigation amount’. However, there was no influence of different irrigation strategies on the fruit yield and irrigation water use efficiency using the same total irrigation amount under the same soil texture. Greater photosynthetic rate, leaf area, plant height, and number of internodes were obtained, when the accumulated solar radiation of 25 MJ/m² was set as the irrigation starting point, together with each irrigation amount of 3.22, 3.56, and 2.77 mm for the loam, clay loam, sandy loam, respectively. The highest contents of soluble sugar and vitamin C and the lowest nitrate content were all achieved, when the accumulated solar radiation of 20 MJ/m² was set as the irrigation starting point, together with the irrigation amount of 2.59, 2.85, and 2.22 mm for the loam, clay loam, sandy loam, respectively. Meanwhile, there was no significant difference in soil textures on the contents of soluble sugar, soluble protein, and vitamin C. Therefore, controlling accumulated solar radiation can be expected to serve as the irrigation starting point for the feasible irrigation strategy in protected cultivation. Meanwhile, the discrepant parameters of accumulated solar radiation as an irrigation starting point should be considered for the different cultivation goals under various soil textures.

Keywords: greenhouse; irrigation; soil; cucumber; accumulated solar radiation; quality