

不同亏缺灌溉对景电灌区设施膜下滴灌番茄生长、产量及水分利用效率的影响

曾树人¹, 陈亮^{2,3}, 李旺雄⁴, 张生银⁴, 刘斌^{1,3}

(1. 甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心 甘肃白银 730400; 2. 甘肃省农业工程技术研究院 甘肃武威 733006; 3. 甘肃农业大学园艺学院 兰州 730070; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院 兰州 730030)

摘要:为探究景电灌区设施大棚番茄膜下滴灌种植模式下的适宜节水灌溉管理制度,提高灌区农业灌溉水利用效率,以凤珠 409 为试材,以土壤田间持水量 90%为灌水上限、70%为灌水下限时的灌水量为对照(CK),在番茄第 1 穗果开花盛期时开始设置 4 种亏缺灌溉处理[85%CK(L1)、70%CK(L2)、55%CK(L3)、40%CK(L4)],研究不同处理对番茄植株生长、果实品质、产量及水分利用效率的影响。结果表明,与 CK 相比,L2 处理对番茄各生育期的株高、茎粗无显著影响,叶片 SPAD 值在开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期分别显著提高了 9.99%、8.79%、8.53%。在果实品质方面,L2 处理的可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素、维生素 C 含量及糖酸比均显著高于 L3、L4 处理和 CK,较 CK 分别提高了 1.08 百分点、1.35 百分点、7.26%、7.06%、41.90%,硝酸盐和可滴定酸含量较 CK 分别显著降低了 15.55%、0.08 百分点。L2 处理的产量与 CK 无显著差异,但水分利用效率显著提高了 45.32%。综合番茄植株生长、果实品质、产量和水分利用效率指标,通过主成分分析综合评分,L2 处理得分最高,表明在景电灌区设施大棚番茄膜下滴灌种植模式下,70%CK(3 128.17 m³·hm⁻²)为最优灌水量,可在保证产量的同时显著提升果实品质和水分利用效率,实现减水增效目标。

关键词:番茄; 亏缺灌溉; 膜下滴灌; 产量; 水分利用效率

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)08-138-08

Effects of different irrigation deficits on the growth, yield, and water use efficiency of tomato under sub-mulch drip irrigation in the Jingdian irrigation district

Zeng Shuren¹, Chen Liang^{2,3}, Li Wangxiong⁴, Zhang Shengyin⁴, Liu Bin^{1,3}

(1. Gansu Jingtaichuan Irrigation Water Resources Utilization Center, Baiyin 730400, Gansu, China; 2. Gansu Academy of Agri-Engineering Technology, Wuwei 733006, Gansu, China; 3. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: To explore a suitable water-saving irrigation regime and boost water use efficiency for mulch-drip-irrigated greenhouse tomato in Jingdian irrigation district, Fengzhu 409 was used as the test material. The irrigation amount at 90% of field water-holding capacity as the upper limit and 70% as the lower limit was set as the control (CK). Four regulated deficit irrigation treatments [85% CK (L1), 70% CK (L2), 55% CK (L3), and 40% CK (L4)] were established starting from the full-bloom stage of the first fruit cluster, to investigate the effects of different treatments on tomato vegetative growth, fruit quality, yield, and water use efficiency. The results showed that compared with CK, treatment L2 exerted no significant effects on plant height or stem diameter across all tomato growth stages, while the leaf SPAD value significantly increased by 9.99%, 8.79% and 8.53% at the flowering and fruit-setting stage, fruit expansion stage, and fruit ripening stage, respectively. In terms of fruit quality, the content of soluble solids, soluble sugar, lycopene, vitamin C and sugar-acid ratio in L2 were markedly higher than those in L3, L4 and CK, increasing by 1.08 percentage points, 1.35 percentage points, 7.26%, 7.06%, and 41.90%, respectively, compared with CK. Meanwhile, the nitrate and titratable acid content of

收稿日期:2026-03-20; 修回日期:2026-05-28

基金项目:甘肃省科技重大专项(24ZDNA008); 甘肃省青年科技基金项目(23JRRD0001); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(25GSLK061)

作者简介:曾树人,男,高级工程师,主要从事农业灌区建设管理与节水灌溉技术研究工作。E-mail:1779677538@qq.com

通信作者:刘斌,男,高级工程师,主要从事作物节水栽培技术研究。E-mail:347582892@qq.com

L2 were significantly reduced by 15.55% and 0.08 percentage points, respectively, compared with CK. There was no significant difference in tomato yield between L2 and CK, whereas the water use efficiency of L2 was significantly increased by 45.32%. Based on the omprehensive evaluation of tomato growth, fruit quality, yield, and water use efficiency indicators, principal component analysis (PCA) scoring showed that treatment L2 obtained the highest score, indicating that the irrigation volume of 70% CK ($3\ 128.17\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) was the optimal irrigation amount for greenhouse tomatoes under mulch drip irrigation in the Jingdian irrigation district. This irrigation regime can remarkably enhance fruit quality and water use efficiency while maintaining stable tomato yield, thereby achieving the goal of water reduction and productivity improvement.

Key words: Tomato; Deficit irrigation; Sub-mulch drip irrigation; Yield; Water use efficiency

近年来,随着全球气候变暖、季节性极端干旱等资源环境恶化及约束的加剧,可利用的淡水资源和农业灌溉用水日益减少,水已经成为限制农业生产的决定性因素^[1-2]。因此如何实现农业节水、粮食增产、提质增效和农业可持续发展,成为当前科学研究的热点问题之一^[3-4]。设施农业作为农业现代化的重要标志,被认为是保障粮食安全和应对气候变化的有效途径之一^[5]。据统计,截止到2022年底,我国大中拱棚以上设施面积达285万 hm^2 ,占世界设施农业面积的80%以上,并且多集中在西北干旱半干旱地区^[6]。其中设施番茄的经济效益相对较高,其果实富含维生素C、番茄红素、多种氨基酸等营养成分,并具有独特风味。随着我国农业供给侧结构性改革深入推进和人们消费水平升级,番茄在中国南北各地广泛栽培,尤其在设施农业蔬菜栽培中占据重要地位^[7],但因番茄栽培过程中耗水量大且对水分亏缺较敏感^[8],基于我国农业灌溉水资源匮乏现状,研究适宜区域性番茄亏缺灌溉制度,对实现低成本、高产及资源高效利用生产具有重要意义。

膜下滴灌是一种将覆膜与灌溉相结合的节水灌溉技术。研究表明,膜下滴灌可以直接向根区局部精准供水供肥,显著减少灌溉水无效径流与渗流,节水节肥效果突出^[9]。目前已广泛应用于设施蔬菜、果树等经济作物^[10]。甘肃景泰位于甘肃中部,属典型干旱区,尽管有景泰川电力提灌工程保障农业灌溉用水,但地处腾格里沙漠向黄土高原过渡地带,降水量较少,但蒸发量极大,多年平均蒸发量是降雨量的9~16倍,农业灌溉水资源极度匮乏^[11]。近年来,随着高标准农田和设施农业快速发展,设施番茄种植面积逐年扩大。据统计,景电灌区2024—2025年设施膜下滴灌番茄种植面积约占当地设施农业面积的60%,但由于设施农业和膜下滴灌应用时间短,技术水平参差不齐,灌溉管理仍存在诸多问题。因此探寻设施番茄最优水分亏缺灌溉程度与灌水量,促使光合产物向产品器官分配,同时提高果实产量和品质,已成为当前节水灌溉研究的热

点^[12]。目前,多数研究集中于灌水量、灌溉频次或土壤水分阈值(如田间持水量)的灌溉制度优化。赵银平等^[13]研究指出,合理的灌溉策略可促进植株生长,提高产量和品质。研究表明,基于节约水资源的优先考虑,以番茄蒸散量(ET_0)为基准,75% ET_0 灌水量可作为设施番茄的节水灌溉制度^[14]。高定能^[15]对比了蒸发皿、气象站、土壤水分和经验灌溉4种灌水取值方法,发现基于土壤水分灌溉制度最为科学合理,节水效果显著。韩瑛祚等^[16]以田间持水量 θ 为基准,设置不同灌水下限,发现在辽宁地区早春茬番茄种植中,前期采用60% θ 、成熟期采用50% θ 的灌溉下限、保持灌溉定额为 $80\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,可获得较高的综合效益。也有研究表明,苗期减少50%灌水量可在保证产量的前提下节约灌水量18%^[17]。刘晓奇等^[18]研究发现,在日光温室基质栽培条件下,第1穗果坐果后进行60%水分亏缺灌溉,可显著提高番茄红素和可溶性糖含量。

目前,关于设施番茄膜下滴灌需水规律的研究已较为丰富,普遍认为适宜土壤水分阈值可提高产量、品质和水分利用效率^[2],但研究结果因地区气候、设施类型、土壤条件和灌溉管理方式不同而存在差异,而针对甘肃景电灌区设施大棚番茄膜下滴灌种植模式节水灌溉制度的研究尚鲜见报道。鉴于此,本研究立足该区域,以土壤田间持水量为基准设定灌水上限和灌水下限,研究不同亏缺灌溉处理对番茄植株生长、果实品质、产量及水分利用效率的影响,旨在为区域设施大棚番茄膜下滴灌灌溉制度优化提供科学依据,实现高产高效节水目标。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心灌溉试验站。试验温室为钢架结构,长95.0 m,宽8.5 m,高4.5 m,后墙为1.2 m厚土墙,覆盖材料为聚乙烯膜,种植面积为550 m^2 。试验区属温带干旱型大陆气候,年日照时数2652 h,年平均辐射量

$6.18\times10^5\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$,年平均气温 $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 191 d。土壤类型为壤土,0~40 cm 土层田间最大持水量为 28.86%,土壤有机质含量(w,后同) $12.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $75.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $112.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $289.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为 8.24。

1.2 材料

供试番茄品种为凤珠 409(台湾农友种苗公司繁育),无限生长型,红色小果,皮薄肉细,酸甜适口,综合抗逆性强,适合保护地长季节栽培。

1.3 试验设计

采用单因素随机区组试验设计。以田间持水量 90%为灌水上限、70%为灌水下限的灌水量为对照(CK),设置 4 个亏缺灌溉处理:85%CK(L1)、

70%CK(L2)、55%CK(L3)、40%CK(L4),灌溉湿润土层深度为 25 cm。试验共 5 个处理,3 次重复,15 个小区,小区面积为 $18.6\text{ m}^2(3.0\text{ m}\times6.2\text{ m})$,各小区之间留 2 行作为保护行。2024 年 9 月 2 日定植番茄苗,10 月 10 日(第 1 穗果开花盛期)开始亏缺灌溉处理,至次年 1 月 5 日拉秧采收结束。采用 TRIME PICO 32 便携式土壤水分测量仪监测土壤含水量,结合烘干法校正,当土壤含水量降至灌水下限启动灌溉至上限。单次灌水量按公式(1)计算,各小区安装水表记录全生育期灌水量(表 1)。

$$M=S\times\gamma\times H\times Q\times(q1-q2)\times10^{-3};\tag{1}$$

式中, M 为灌溉量(m^3); S 为试验栽培面积(18.6 m^2); γ 为土壤容重($1550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); H 为计划湿

表 1 不同处理灌水量
Table 1 Irrigation amount of different treatments

处理 Treatment	灌水下限 Irrigation lower limit	小区单次灌水量 Single irrigation amount of experimental plot/ $(\text{m}^3\cdot\text{plot}^{-1}\cdot\text{time}^{-1})$	全生育期灌水量 Total irrigation amount for the entire reproductive period/ $(\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2})$
L1	85%CK	0.36	3 766.06
L2	70%CK	0.29	3 128.17
L3	55%CK	0.23	2 675.04
L4	40%CK	0.17	2 360.49
CK	田间持水量 70%~90% 70%-90% of field capacity	0.42	4 311.56

润层深度(0.25 m); Q 为土壤田间最大持水量(28.86%); $q1$ 、 $q2$ 分别代表灌水上、下限(田间持水量百分比)。

采用高垄单行栽培,垄高 20 cm,垄面宽 40 cm,沟宽 50 cm,株距 35 cm,膜下滴灌,黑色地膜覆盖,贴片式滴灌带,滴头间距 20 cm,滴头流量 $2.3\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。每垄铺设 1 行滴灌带。各小区施肥及其他田间管理措施按高产栽培要求统一进行。

1.4 测定指标与方法

在番茄第 1 穗果开花坐果期、果实膨大期、成熟期,每个小区选取 5 株长势一致的植株,分别用卷尺、游标卡尺测定株高和茎粗。

在上述生育期,每个小区选取 3 株长势一致的植株,每株选取 3 片健康无病虫害的鲜绿叶片,使用 SPAD-502 型便携式叶绿素仪测定 SPAD 值,记录 3 组稳定值取平均值。

采收期每个小区选取 5 株长势一致的植株标记,分次采摘,记录单株结果数和单果质量。每个小区选取 5 个成熟度一致的果实,预处理后立即送至甘肃省干旱生境作物重点实验室测定品质指标。采用 PAL-1 手持式折射计测定可溶性固形物

含量,采用蒽酮-硫酸比色法测定可溶性糖含量,采用 NaOH 滴定法测定可滴定酸含量,糖酸比=可溶性糖含量/可滴定酸含量,采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素 C 含量^[19];采用高效液相色谱(HPLC)法测定番茄红素含量^[18];采用紫外吸收法测定硝酸盐含量^[7]。

水分利用效率(WUE)= Y_a/E_T 。
式中, Y_a 为产量, E_T 为灌水量^[7]。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理试验数据,并绘制图表,采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析(ANOVA)和主成分分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同亏缺灌溉处理对番茄植株生长的影响

由表 2 可知,随着亏缺灌溉程度的加重,番茄开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期的植株株高均呈先增后降趋势,L2 处理最高,在各生育期的株高分别为 59.18、146.23、192.06 cm,与 L1(开花坐果期、果实膨大期)及 CK 均无显著差异,但显著高于

L3、L4 处理。L2 处理在果实成熟期的株高显著高于 L1 处理,分别较 L1、L3、L4 处理显著增加了 8.06%、12.72%、15.39%。以上结果表明,适度亏缺灌溉(L2)对株高无显著抑制,但过度亏缺(L3、L4)会显著抑制植株生长,亏缺灌溉程度总体上以 L2 处理最优。

表 2 不同亏缺灌溉处理对番茄株高的影响			
Table 2 Effects of different water deficiency treatments on plant height of tomato			
处理 Treatment	开花坐果期 Blooming period	果实膨大期 Fruit enlargement period	果实成熟期 Fruit maturity period
CK	57.16±0.59 a	141.04±0.91 ab	187.75±1.26 a
L1	58.51±0.53 a	142.63±1.73 ab	177.73±0.87 b
L2	59.18±0.23 a	146.23±0.46 a	192.06±2.56 a
L3	53.40±0.62 b	140.10±0.43 b	170.38±1.18 c
L4	53.11±0.95 b	138.87±0.91 b	166.44±1.15 c

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

由表 3 可知,随着亏缺灌溉程度加重,番茄各生育期的植株茎粗基本呈先增后减趋势,L2 处理最高,在开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期的茎粗分别为 48.1、88.8、110.0 mm,与 L1 处理(开花坐果期、果实膨大期)和 CK(开花坐果期、果实成熟期)无显著差异,但显著高于 L3、L4 处理。L2 处理果实膨大期的茎粗较 CK 显著增加了 16.69%,果实成熟期较 L1 处理显著增加了 14.58%。以上结果表明,适度亏缺灌溉(L2)对茎粗生长无显著抑制,但过度亏缺则显著抑制,亏缺灌溉程度总体上以 L2 处理最优。

由表 4 可知,番茄各生育期叶片 SPAD 值随亏缺程度加重呈现先升后降趋势,L2 处理最高,在开花坐果期、果实膨大期、果实成熟期分别为 46.25、53.71、45.40,均显著高于 L3、L4 处理和 CK,较 CK 分别显著提高了 9.99%、8.79%、8.53%。L2 处理在

表 3 不同亏缺灌溉处理对番茄茎粗的影响			
Table 3 Effects of different water deficiency treatments on stem thickness of tomato			
处理 Treatment	开花坐果期 Blooming period	果实膨大期 Fruit enlargement period	果实成熟期 Fruit maturity period
CK	45.9±0.16 ab	76.1±0.22 b	108.1±0.34 a
L1	46.2±0.16 ab	82.6±0.30 ab	96.0±0.16 b
L2	48.1±0.14 a	88.8±0.22 a	110.0±0.52 a
L3	39.9±0.19 c	72.7±0.13 c	91.6±0.35 c
L4	32.5±0.13 c	71.1±0.12 c	82.6±0.17 c

果实膨大期的 SPAD 值显著高于 L1 处理,但开花坐果期和果实成熟期与 L1 处理差异不显著。以上结果表明,适度亏缺灌溉可提高叶片 SPAD 值,但过度亏缺会降低 SPAD 值,亏缺灌溉程度总体上以 L2 处理最优。

表 4 不同亏缺灌溉处理对番茄叶片 SPAD 值的影响			
Table 4 Effects of different water deficiency treatments on SPAD values of tomato leaves			
处理 Treatment	开花坐果期 Blooming period	果实膨大期 Fruit enlargement period	果实成熟期 Fruit maturity period
CK	42.05±0.29 b	49.37±0.57 b	41.83±0.97 b
L1	43.89±1.06 ab	51.36±0.64 b	44.33±0.61 a
L2	46.25±0.26 a	53.71±0.44 a	45.40±0.62 a
L3	37.98±0.30 c	45.44±0.41 c	37.50±0.65 c
L4	34.16±1.20 c	43.66±0.85 c	35.09±0.83 c

2.2 不同亏缺灌溉处理对番茄果实品质的影响

随着亏缺灌溉程度加重,番茄果实的可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素、维生素 C 含量及糖酸比均呈先升后降趋势,L2 处理最高;可滴定酸和硝酸盐含量呈先降后升趋势,L2 处理最低(表 5)。其中 L2 处理的可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素和维生素 C 含量及糖酸比均显著高于 L3、L4 处理和 CK,较 CK 分别显著提高了 1.08 百分点、1.35 百分点、7.26%、7.06%和 41.90%,硝酸盐和可滴定酸含量较 CK 分别显著降低 15.55%和 0.08 百分点。此

表 5 不同亏缺灌溉处理对番茄果实品质的影响							
Table 5 Effects of different water deficiency treatments on quality of tomato fruit							
处理 Treatment	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可滴定酸) Titratable acid content/%	糖酸比 Sugar-acid ratio	w(番茄红素) Lycopene content/ (mg·kg ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·kg ⁻¹)	w(硝酸盐) Nitrate content/(mg·kg ⁻¹)
CK	8.14±0.46 b	6.12±0.29 c	0.57±0.02 a	10.74±0.37 c	35.65±3.43 b	385.43±10.82 b	173.94±5.44 a
L1	8.83±0.21 a	6.68±0.14 b	0.51±0.03 b	13.10±0.61 b	37.33±3.12 ab	392.15±14.09 ab	152.16±3.31 b
L2	9.22±0.35 a	7.47±0.26 a	0.49±0.04 b	15.24±0.46 a	38.24±2.58 a	412.64±17.71 a	146.89±5.27 b
L3	7.38±0.24 c	5.44±0.19 d	0.55±0.06 ab	9.89±0.33 d	32.72±1.75 c	356.57±12.09 c	175.40±7.38 a
L4	7.16±0.31 c	5.21±0.11 d	0.59±0.04 a	8.83±0.28 e	30.45±2.17 c	342.32±16.80 c	180.53±4.26 a

外,L2 处理的可溶性固形物、可滴定酸、番茄红素、维生素 C、硝酸盐含量与 L1 处理均无显著差异,但可溶性糖含量和糖酸比均显著高于 L1 处理。以上结果表明,适度亏缺灌溉(L2)会显著提高果实品质,亏缺灌溉程度总体上以 L2 处理最优。

2.3 不同亏缺灌溉处理对番茄产量及水分利用效率的影响

由表 6 可知,随着亏缺灌溉程度加重,番茄产量和水分利用效率呈先升后降趋势,L2 处理最高。

其中 L2 处理的产量显著高于 L3 和 L4 处理,但与 L1 处理和 CK 无显著差异。在水分利用效率方面,L2 处理为 24.69 kg·m⁻³,显著高于其他处理和 CK,较 CK 显著提高 45.32%。L2 处理的单果质量和单穗果数同样表现较大,显著高于 L3 和 L4 处理,但与 L1 处理和 CK 差异不显著。以上结果表明,适度亏缺灌溉(L2)可在不显著影响产量的前提下,显著提高水分利用效率,亏缺灌溉程度总体上以 L2 处理最优。

表 6 不同亏缺灌溉处理对番茄果实产量和水分利用效率的影响
Table 6 Effects of different water deficiency treatments on tomato fruit yield and water use efficiency

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	单穗果数 Number of fruits per truss	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency/(kg·m ⁻³)
CK	24.24±1.53 a	19.80±0.33 a	63.99±2.32 a	16.99±1.03 c
L1	24.38±1.81 a	20.40±1.20 a	64.65±2.40 a	20.67±1.25 b
L2	24.67±1.29 a	20.60±0.33 a	66.06±2.10 a	24.69±1.08 a
L3	22.37±0.93 b	18.20±0.58 b	58.35±2.38 b	21.81±0.96 b
L4	20.65±1.15 c	16.40±0.58 c	54.18±2.47 c	12.57±1.32 d

2.4 不同亏缺灌溉处理各指标的相关性分析与主成分分析

相关性分析(图 1-A)表明,可滴定酸和硝酸盐含量与其他指标均呈负相关,且两者呈显著正相关($r=0.97$);其余指标均呈正相关。其中产量与单果质量($r=1.00$)、单穗果数($r=0.99$)、叶片 SPAD 值($r=0.92$)、株高($r=0.90$)、茎粗($r=0.89$)均呈显著正相关。叶片 SPAD 值与可溶性固形物含量($r=0.99$)、可溶性糖含量($r=0.98$)、糖酸比($r=0.98$)、番茄红素含量($r=0.97$)、维生素 C 含量($r=0.97$)均呈显著正相关。糖酸比与可溶性糖含量($r=0.99$)呈显著正相关,与可滴定酸含量($r=-0.95$)呈显著负相关。产量与水分利用效率呈正相关($r=0.69$)。

主成分分析(图 1-B)显示,前 2 个主成分累计贡献率为 95.2%(PC1=87.6%、PC2=7.6%)。可滴定酸和硝酸盐含量分布在第二主成分中,与其他指标显著分离;其他指标均分布在第一主成分中。L2、L1 处理与 CK 和其他处理明显分离,分布在第四象限,可溶性固形物含量、可溶性糖含量、叶片 SPAD 值、糖酸比、水分利用效率更接近 L2、L1 处理;CK 分布在第一象限,株高、茎粗、单果质量、单穗果数、维生素 C 含量、番茄红素含量和产量更接近 CK。尽管 CK 分布在第一象限,但 L2 和 L1 处理的产量与 CK 无显著差异,但显著提升了水分利用效率和果实品质。

通过对番茄植株生长、果实品质、产量、水分利

用效率相关的 14 个指标进行主成分提取分析,得到了主成分特征值、贡献率和累计贡献率(表 7)。按照特征值大于 1 或累计贡献率大于 95%原则提取到 2 个主成分,特征值分别为 12.26 和 1.07,累计贡献率为 95.21%,其表达式为:

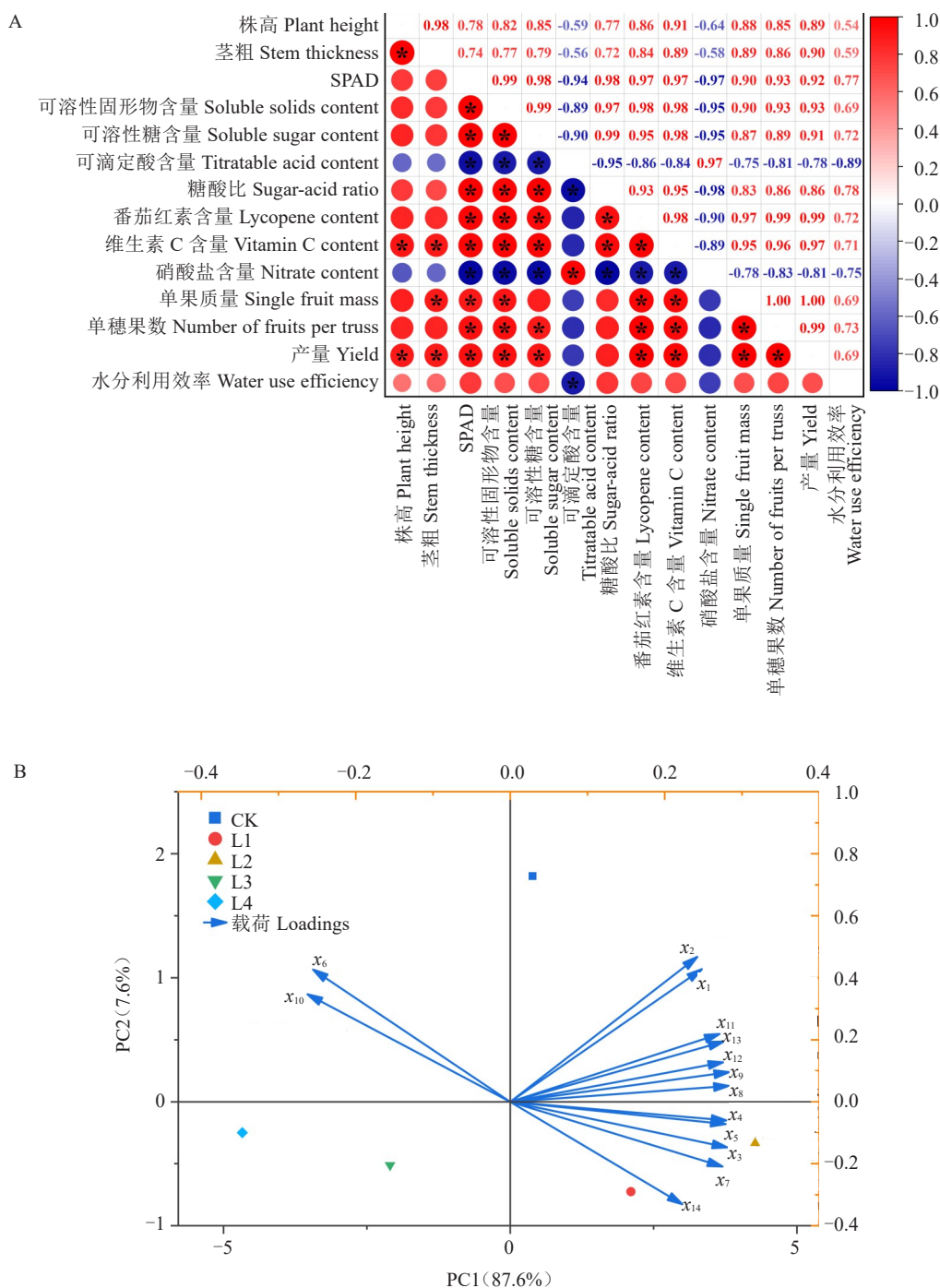
$$Z_1=0.25x_1+0.24x_2+0.28x_3+0.28x_4+0.28x_5-0.26x_6+0.27x_7+0.28x_8+0.28x_9-0.26x_{10}+0.27x_{11}+0.28x_{12}+0.28x_{13}+0.22x_{14};$$

$$Z_2=0.43x_1+0.47x_2-0.15x_3-0.06x_4-0.07x_5+0.43x_6-0.21x_7+0.05x_8+0.10x_9+0.34x_{10}+0.22x_{11}+0.13x_{12}+0.19x_{13}-0.33x_{14}。$$

以各个主成分相对应的方差贡献率作为权重,由主成分得分和对应的权重线性求和,构建综合评价函数 $Y=0.92Z_1+0.08Z_2$,计算各处理的综合得分并排序(表 8)。L2 处理得分最高(3.90),表明在景电灌区设施番茄膜下滴灌种植模式下,70%CK (3 128.17 m³·hm⁻²)为最优灌水量。

3 讨论与结论

在资源约束日益加剧的背景下,发展低投入、高产出的作物生产模式是保障粮食安全与农业可持续发展的必然选择。水作为作物生长的关键生态因子,对番茄的生长发育、品质形成和产量具有显著影响^[2]。因此,如何在合理降低灌溉水量的前提下实现稳产甚至增产,是确定番茄最优灌溉管理制度的关键。研究表明,轻度亏缺灌溉可提高作物



注:*表示在 0.05 水平显著相关。 $x_1 \sim x_{14}$ 分别为株高、茎粗、SPAD 值、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、可滴定酸含量、糖酸比、番茄红素含量、维生素 C 含量、硝酸盐含量、单果质量、单穗果数、产量和水分利用效率。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level. $x_1 \sim x_{14}$ represents plant height, stem thickness, SPAD value, soluble solids content, soluble sugar content, titratable acid content, sugar-acid ratio, lycopene content, vitamin C content, nitrate content, single fruit mass, number of fruits per truss, yield and water use efficiency, respectively.

图 1 不同亏缺灌溉处理各指标的相关性分析(A)与主成分分析(B)

Fig. 1 Correlation analysis(A) and principal component analysis(B) of various indicators under different water-deficient irrigation treatments

的耐旱性和节水性,同时实现作物稳产或增产^[20]。史田斌等^[21]研究发现,不同生育期亏缺灌溉条件下的马铃薯生长、产量和水分利用效率存在差异。本

研究在番茄第 1 穗果开花盛期进行 4 种不同程度的亏缺灌溉处理,结果表明,随着亏缺程度加重,各生育期的株高、茎粗、叶片 SPAD 值均呈先增后降

表 7 主成分提取分析
Table 7 Principal component extraction analysis

主成分因子 Principal component factor	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
PC1	12.26	87.59	87.59
PC2	1.07	7.62	95.21

表 8 综合评价结果
Table 8 The results of comprehensive evaluation

处理 Treatment	Z ₁	Z ₂	得分 Score	排名 Rank
CK	0.39	1.82	0.51	3
L1	2.10	-0.72	1.88	2
L2	4.27	-0.33	3.90	1
L3	-2.09	-0.51	-1.97	4
L4	-4.67	0.25	-4.32	5

趋势,L2 处理表现最优。L2 和 L1 处理在各生育期的株高和茎粗均与 CK 基本无显著差异,但 L2 处理的叶片 SPAD 值在各生育期均显著高于 CK,而 L1 仅在果实成熟期表现出显著差异。当亏缺程度达到 L3 时,番茄植株生长和叶片 SPAD 值均受到显著抑制,表明 L2 为最优处理,这与史田斌等^[21]在马铃薯块茎形成期的研究结果一致,也与程铭慧^[22]关于过度水分亏缺会抑制玉米生长(株高、茎粗和叶面积)的结论相符。黄媛等^[2]研究发现,结果前期以 70%FC(田间持水量)或 60%FC 为灌溉下限可显著提高番茄叶片净光合速率,与本研究对叶片 SPAD 值的影响规律一致。由此可见,适度亏缺不仅不会抑制植株生长,反而可能增强耐旱性,促进叶片光合能力提升,其内在生理生化机制还有待进一步研究。

蔬菜品质是评价其商品价值的重要指标。本研究中,不同亏缺灌溉处理下番茄果实品质指标存在显著差异。黄媛等^[2]和赵银平等^[13]研究发现,随水分亏缺程度加重,番茄果实中维生素 C、可溶性糖、有机酸含量及糖酸比均有提高。也有学者指出,可溶性固形物、维生素 C 含量随灌水量减少而提高^[23-24],与本研究结果一致,随亏缺灌溉程度加重,可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素、维生素 C 含量及糖酸比均呈先升后降趋势,L2 处理最高,可滴定酸和硝酸盐含量呈先降后升趋势,L2 处理最低,果实养分含量及风味最佳。可能原因是适度亏缺灌溉显著提高了番茄叶片 SPAD 值,增强了番茄叶片光合能力,促进了番茄干物质积累,为品质提升提

供了碳骨架基础。张正斌等^[25]研究发现,轻度水分胁迫可以诱导番茄植株的渗透调节响应,叶片和果实中会积累脯氨酸、可溶性糖、甜菜碱等渗透调节物质以维持细胞膨压和水分吸收,促进可溶性糖和可溶性固形物的积累。也有学者研究表明,在水分受限条件下,光合产物向果实分配的优先级提高,果实成为“库”器官中的强势库,从而提升单位果实的干物质含量和风味物质浓度^[18]。此外,水分亏缺在一定程度上抑制根系对硝酸盐的过量吸收,同时促进氮代谢向氨基酸和蛋白质合成方向的有限流动,从而降低果实中硝酸盐和可滴定酸含量,改善糖酸比^[17]。因此,适度亏缺灌溉比充分灌溉更有利于提升番茄果实品质。

提高水分利用效率是干旱半干旱地区水资源受限条件下实现作物增产的重要措施^[26]。研究表明,在一定范围内,作物产量与灌水量呈正相关,适当灌水可在提高产量的同时提升水分利用效率^[27]。本研究发现,随亏缺灌溉程度加重,番茄产量和水分利用效率均呈先升后降趋势,与张辉等^[28]研究温室番茄膜下滴灌不同生育时期灌水控制下限与产量呈抛物线关系的结论一致,也与颜俊等^[29]关于开花坐果期适当亏缺更有利于营养生长向生殖生长转化,提高水分利用效率的结果相符。本研究中,L2 处理的产量与 CK 无显著差异,但水分利用效率显著提高了 45.32%,与程铭慧等^[22]的研究结果一致。

综上所述,在景电灌区设施大棚番茄膜下滴灌种植模式下,不同亏缺灌溉对植株生长、果实品质、产量和水分利用效率均有显著影响。综合各项指标,通过主成分分析,L2 处理(70%CK, 3 128.17 m³·hm⁻²)得分最高,为最优灌水量,可在保证产量的同时显著提升果实品质和水分利用效率,实现减水增效目标。

参考文献

[1] 王平,陈娟,谢成俊,等.干旱地区覆盖方式对土壤养分及马铃薯产量的影响[J].中国土壤与肥料,2021(4):118-125.
[2] 黄媛,于景鑫,杜亚茹,等.基于土壤含水量的灌溉制度对番茄生理、产量及水分利用效率的影响[J].中国瓜菜,2023,36(3):64-68.
[3] Long S P, Ort D R. More than taking the heat: Crops and global change[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13 (3) : 240-247.
[4] 樊胜岳,周宁,刘文文.走出马尔萨斯陷阱:人口压力与沙漠化的关系[J].干旱区地理,2020,43(1):218-226.
[5] Nishad S, Krupa I. Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review[J]. Sustainable

- Energy Technologies and Assessment, 2022, 52: 102241.
- [6] 杨舒. 科技赋能“菜篮子”, 设施农业大有可为[N]. 光明日报, 2022-05-26(8).
- [7] 闫沛玉, 张生银, 陈亮, 等. 不同水肥耦合对设施栽培番茄生长、产量和品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(12): 2516-2524.
- [8] 雷涛, 郭向红, 毕远杰, 等. 基于 Logistic 模型的番茄生长特性研究[J]. 节水灌溉, 2020(10): 10-14.
- [9] 刘翔, 张富仓, 向友珍, 等. 亏缺灌溉对南疆棉花生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12): 1270-1276.
- [10] 奚云霄, 刘静, 常明. 节水灌溉对粮食作物种植的影响: 基于农业劳动力资源的调节效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 458-469.
- [11] 史中兴, 廖赞, 陈亮, 等. 凹凸棒石盐碱阻隔材料不同铺设量对景电灌区萝卜生长及产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(10): 124-131.
- [12] 韩玉薪, 杨福鑫, 岳焕芳, 等. 膜下滴灌灌水控制下设施番茄品质和水分利用效率分析[J]. 北方园艺, 2023(18): 43-53.
- [13] 赵银平, 孙利萍, 史亮, 等. 水分亏缺对拱棚水果番茄产量及品质的影响[J]. 耕作与栽培, 2024, 44(4): 78-80.
- [14] 张坤. 不同灌溉量和滴灌频率对加工番茄生长、产量和品质的调控效应[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2018.
- [15] 高定能. 不同灌溉制度对设施番茄生长的影响[J]. 农业工程技术, 2024, 44(12): 11-13.
- [16] 韩瑛祚, 赵颖, 刘爱群, 等. 基于灌水下限和灌水额调控的设施番茄灌溉施肥制度研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 51-60.
- [17] 李旭峰, 孙西欢, 马娟娟, 等. 膜下滴灌不同水分处理对温室番茄根系活力和水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2019(12): 53-57.
- [18] 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.
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- [20] 雷成霞, 申孝军, 郭银. 地下滴灌条件下水分胁迫对棉花生理性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(4): 57-61.
- [21] 史田斌, 刘震, 李志涛, 等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 193-202.
- [22] 程铭慧. 时空亏缺灌溉对玉米生长、生理特性及水分利用效率的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [23] 哈婷, 张向梅, 李建设, 等. 营养液供液量及供液频率对高糖度番茄生长、产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(10): 1484-1491.
- [24] 吴泳辰, 韩国君, 陈年来. 调亏灌溉对加工番茄产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 104-107.
- [25] 张正斌, 徐萍, 董宝娣, 等. 水分利用效率: 未来农业研究的关键问题[J]. 世界科技研究与发展, 2005(1): 52-61.
- [26] 王玉玉, 李爽, 杨玉婷, 等. 西北地区控水灌溉对番茄品质影响的研究进展[J]. 江西农业学报, 2025, 37(11): 13-21.
- [27] 闫士朋, 焦润安, 张俊莲, 等. 灌溉量对马铃薯生理特性及块茎产量品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 41-51.
- [28] 张辉, 张玉龙, 虞娜, 等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 425-432.
- [29] 颜俊, 孙美丽, 卢姿竹, 等. 灌溉方式对设施番茄蒸腾量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(增刊2): 81-85.