

水分亏缺对设施基质栽培番茄生长生理及水分利用效率的影响

高京¹, 陈玉鹏¹, 刘晓奇¹, 王俊文¹, 吕剑¹, 肖雪梅^{1,2}, 郁继华^{1,2}

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境

作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 研究水分亏缺对设施基质栽培番茄生长生理及水分利用效率的影响, 为番茄优质高产提供依据。以毛粉 802 和 181 番茄品种为试材, 设正常灌溉、轻度水分亏缺 (80%正常灌水量)、中度水分亏缺 (60%正常灌水量)和重度水分亏缺(40%正常灌水量)4个水分亏缺处理, 探究对不同品种番茄的株高、茎粗、叶面积、光合参数、单株产量、单株结果数、单果重及水分利用效率的影响。结果表明, 随着水分亏缺程度的加重, 2 个品种番茄的株高、茎粗、叶面积均呈下降趋势; 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)呈现下降趋势; 产量整体呈下降趋势, 水分利用率整体呈增加趋势。轻度水分亏缺(80%正常灌水量)能够在提高植株的水分利用效率的同时, 满足产量的基本需求。毛粉 802 与 181 相比, 减产量相对较小, 水分利用效率相对较高, 更适用于水分亏缺条件下的栽培生产。

关键词: 水分亏缺; 番茄; 基质栽培; 生长生理; 水分利用效率

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)04-0331-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.04.008

Effects of Water Deficit on the Growth Physiology and Water Use Efficiency of Tomatoes Grown in Facility Substrates

GAO Jing¹, CHEN Yupeng¹, LIU Xiaoqi¹, WANG Junwen¹, LÜ Jian¹, XIAO Xuemei^{1,2}, YU Jihua^{1,2}

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Gansu Provincial Key

Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: This study investigated the effect of water deficit on growth physiology and water use efficiency of tomatoes under soilless substrate cultivation, aiming to provide a theoretical basis for high yield and high quality in tomato production. Using tomato varieties Hairy Powder 802 and 181 as experimental materials, 4 water deficit gradients were established, i.e., normal irrigation, mild (80% normal irrigation), moderate (60% normal irrigation) and severe water deficit (40% normal irrigation), effects on plant height, stem diameter, leaf area, photosynthetic parameters, yield per plant, number of fruit per plant, fruit weight per plant and water use efficiency of different tomato varieties were investigated. Results showed that as the degree of water deficit intensified, both varieties exhibited decreases in plant height, stem thickness and leaf area, the net photosynthetic rate (P_n), the transpiration rate (Tr) and the stomatal conductance (G_s) were getting smaller, the yield showed an overall downward trend, while water use efficiency generally increased. Mild water deficit (80% normal irrigation) improved water use efficiency without significantly reducing yield. Compared with variety 181, hairy powder 802 showed a relatively smaller yield reduction and higher water use efficiency, making it more suitable for cultivation under water-deficit conditions.

Key words: Water deficit; Tomato; Facility substrate; Growth physiology; Water use efficiency

水分对植物生长发育、产量形成均有显著调控作用, 是农业生产中不可或缺的元素之一。然而过量灌溉会造成水资源浪费, 也不利于作物品

质和产量的提高^[1]。中国西北地区气候干燥, 干旱缺水, 因此提高水资源利用效率是农业发展的重要课题之一。番茄是需水量较大的园艺作物,

收稿日期: 2024-06-25; 修订日期: 2025-03-06

基金项目: 甘肃农业大学省级大学生创新创业训练计划项目(S202310733048); 国家自然科学基金(32160703); 甘肃农业大学国重实验室开放基金项目(GSCS-2020-12)。

作者简介: 高京(2002—), 男, 吉林长岭人, 本科在读, 研究方向为蔬菜栽培生理。Email: 2386133297@qq.com。

通信作者: 肖雪梅(1986—), 女, 河北衡水人, 副教授, 硕士, 主要从事设施蔬菜栽培生理与品质调控研究工作。Email: xiaoxm@gsau.edu.cn。

对水分胁迫极为敏感,在水分亏缺条件下会导致内部水分运输减少,限制光合作用所需资源的获取,进而影响番茄的产量和品质^[2]。目前,番茄生产趋于“优质高产,低耗高效”的集约型栽培模式,生产目标也从过去单纯注重产量逐步转向品质和产量并重。适当减量灌溉不仅能实现节水,充分挖掘植物高效利用水分的潜力,提高水分利用率,还能刺激植物根系生长,在一定程度上提高番茄的品质^[3]。

基质栽培能够向植株地下部提供稳定而全面的水分、矿质营养等,保持植株坚挺,提高作物的产量和品质。但基质栽培水分蒸发量较大,在栽培试验和生产中容易产生水分胁迫,从而影响优质农产品的生产。目前,国内外关于水分亏缺对番茄种植的影响研究多集中在产量、品质、生理特性等方面^[4-5],关于水分亏缺对基质栽培番茄影响的全面研究尚少^[6]。为进一步探究设施栽培番茄对不同程度水分亏缺的响应,我们探讨基质栽培下水分亏缺对番茄植株生长、光合作用、产量及水分利用效率的影响,以期筛选出适宜在水分亏缺条件下生长的番茄品种,为番茄的优质高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在甘肃省兰州市榆中县城关镇(35° 87' N, 104° 09' E)李家庄栖云山国家田园综合体六区3号日光温室进行。当地平均海拔 1 700 m,年平均气温 6.6 ℃。

1.2 试验材料

供试番茄品种为毛粉 802(购自甘肃省农业科学院)和 181(购自沈阳佳和园艺科技有限公司)。栽培基质购自甘肃省绿能瑞奇农业科技股份有限公司。

1.3 试验方法

试验采用日光温室槽式栽培,温室长 60 m,跨度 10 m,栽培槽长 9.00 m、宽 0.40 m、深 0.25 m,共 36 槽,每槽填充基质 1 m³,定植 34 株(17株×2 行),行距为 0.20 m,株距为 0.45 m。基质田间最大持水量为 76.55%,容重为 583.91 kg/m³。灌溉方式为膜下滴灌,应用精准灌溉施肥系统。

1.4 试验方法

试验从第 1 穗果中第 1 果坐果率达到 80%时开始进行水分亏缺处理。采用随机区组排列,共设 4 个处理,对照(CK)灌水上限为 90%最大田间持水量,下限为 75%最大田间持水量,其余处理灌水量分别为对照的 80%(T1)、60%(T2)、40%(T3)(表 1),每处理 4 次重复。使用 TRIME PICO 32 水分速测仪(德国 IMKO 公司)保持基质含水量,待含水量到限时灌水至上限,灌水量计算公式如下:

$$M=S \times r \times h \times Q \times (q_1-q_2)$$

式中, M 为每槽灌溉量(m³), S 为试验每槽栽培面积(3.6 m²), r 为基质容重(583.91 kg/m³), h 为计划湿润层深度(0.3 m), Q 为最大田间持水量(76.55%), q_1 、 q_2 分别代表灌水上、下限(田间持水量百分比)。

表 1 不同处理灌水量

处理	每次灌水量 (m ³ /槽)	总灌水量 (m ³ /hm ²)
CK(对照)	72.41	3 625.5
T1(轻度亏水)	57.93	2 982.9
T2(中度亏水)	43.45	2 340.3
T3(重度亏水)	28.96	1 697.8

采用 TRIME PICO 32 土壤水温盐传感器实时监测 CK 的基质含水量,待其下降至 75%的灌水下限时时进行灌溉,直至 90%的灌水上限,记录灌水量,并将此灌水量的 80%、60%、40%对其他各亏水处理进行灌溉。采用 TRIME PICO 32 土壤水温盐传感器对各亏水处理的灌水上下限也进行了监测,发现轻度、中度、重度亏水处理的含水量逐渐下降,前期下降速度较快,后期下降较为缓慢。在水分处理后期,T1 处理的灌水上下限为田间最大持水量的 66%和 58%左右;T2 处理的灌水上下限为田间最大持水量的 59%和 54%左右;T3 处理的灌水上下限为田间最大持水量的约 54%和 49%。

1.5 测定指标与方法

移植后至坐果穗坐果 80%期间,每隔 14 d 测量株高、茎粗、叶片数、叶面积等生长指标 1 次,每行标记 12 株。用直尺测量株高:从根基部到植株生长点的高度;用游标卡尺测量茎粗:以基质上

2 cm 为基准测量植株的直径; 选取每株第 5 片叶片固定测量叶面积, 用直尺测量叶片的长度(L , 叶柄基部到叶尖的距离)和宽度(W , 与主脉垂直的最大宽度), 由长度和宽度计算叶面积(LA)^[6-8]。

小叶(叶长 ≤ 30 cm)的叶面积(LA)= $0.228 L \times W + 8.152$

大叶(叶长 >30 cm)的叶面积(LA)= $0.233 L \times W + 31.387$

在植株结果盛期测定光合参数, 选择晴天上午利用 CIRAS-2 便携式光合测定仪(美国 PP SYSTEMS 公司)选取每株番茄植株第 2 花序下第 1 片叶, 测定其净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i), 重复 3 次。每槽选取 6 株测定单株结果数、单果重, 折算总产量, 重复 3 次。水分利用效率参考吕剑^[7]的方法进行计算。

水分利用效率(WUE)= Y_d/ET
式中, Y_d 为产量, ET 为灌水量。

1.6 统计与分析
使用 Excel 2016 软件分析数据和作图, 利用 SPSS 20.0 软件 Duncan 新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 水分亏缺对番茄植株株高的影响
由图 1 可知, 同一时期 2 个番茄品种的株高均随灌水量的减少而降低, 其中 181 的株高略高于毛粉 802。181 处理 42 d 时, T1、T2、T3 处理的株高分别较 CK 显著降低了 7.52%、12.86%、18.50%。毛粉 802 处理 42 d 时, T2 和 T3 处理株高较 CK 处理显著降低了 20.29%和 27.34%, T1 处理与 CK 无显著性差异。表明水分亏缺对番茄植株株高有抑制作用, 对品种 181 的抑制作用低于毛粉 802。

2.2 水分亏缺对番茄植株茎粗的影响
由图 2 可知, 2 个番茄品种的茎粗均随灌水量的减少而降低, 其中毛粉 802 茎粗略粗于 181。品种 181 处理 42 d 时, T1、T2、T3 处理茎粗分别较 CK 显著降低了 3.56%、5.73%、7.03%。毛粉 802

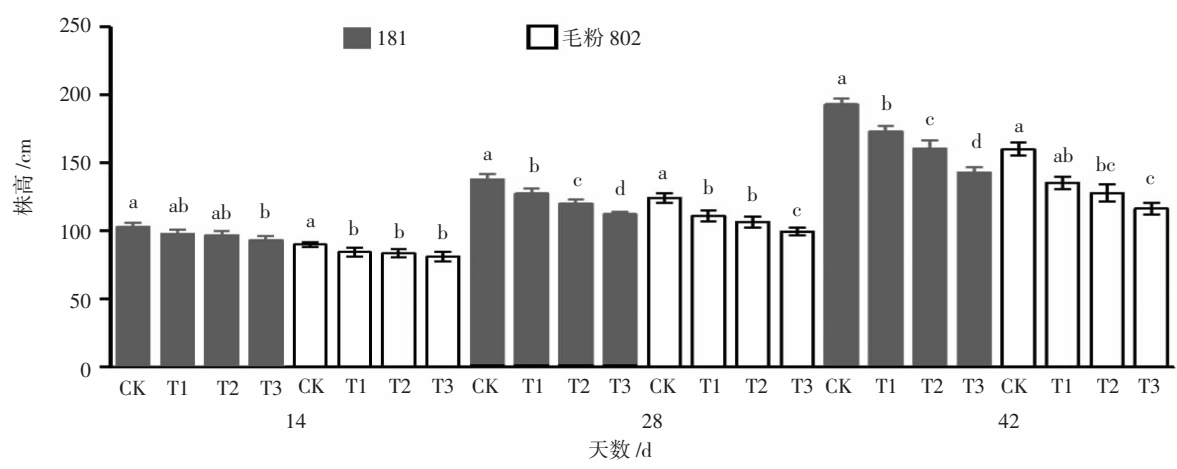


图 1 不同程度水分亏缺处理对番茄株高的影响

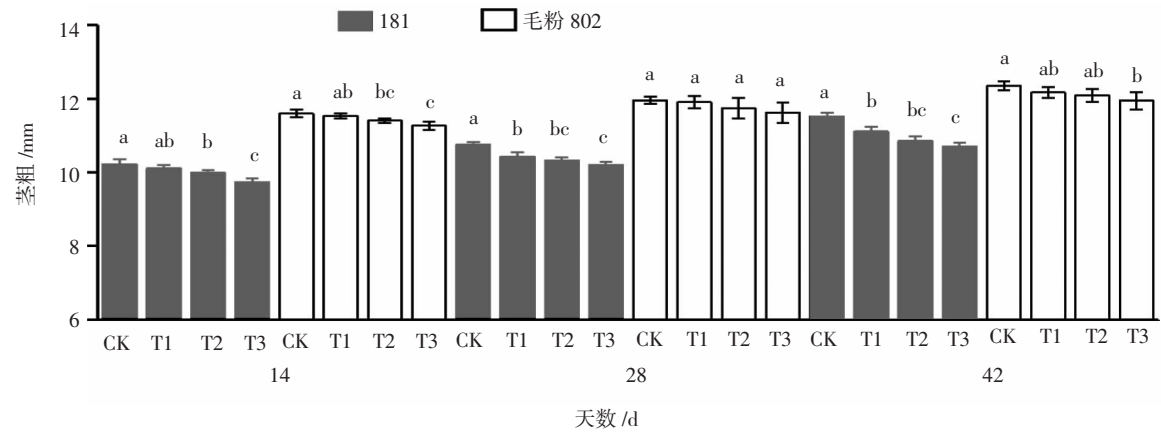


图 2 不同程度水分亏缺处理对番茄茎粗的影响

处理 42 d 时, T3 处理茎粗较 CK 显著降低了 3.23%, T1、T2 处理与 CK 处理无显著性差异。表明水分亏缺对番茄植株茎粗有抑制作用, 对品种 181 的茎粗抑制作用略高于毛粉 802。

2.3 水分亏缺对番茄植株叶面积的影响

由图 3 可知, 两品种番茄的叶面积随灌水量的减少而减小, 品种 181 叶面积略大于毛粉 802。品种 181 处理 42 d 时, T1 处理叶面积与 CK 相比差异不显著, T2、T3 处理叶面积分别较 CK 显著

降低了 5.88%、9.78%。毛粉 802 品种处理 42 d 时, T1 处理叶面积与 CK 相比无显著性差异, T2、T3 处理叶面积较 CK 显著降低了 7.54%、9.13%。表明水分亏缺会抑制番茄植株的叶面积生长, 且水分亏缺越严重, 对番茄叶面积生长的抑制效果越明显。

2.4 水分亏缺对番茄植株光合特性的影响

由图 4A 可以看出, 2 个番茄品种各处理的净光合速率随灌水量的减少呈降低的趋势。T3 处理下

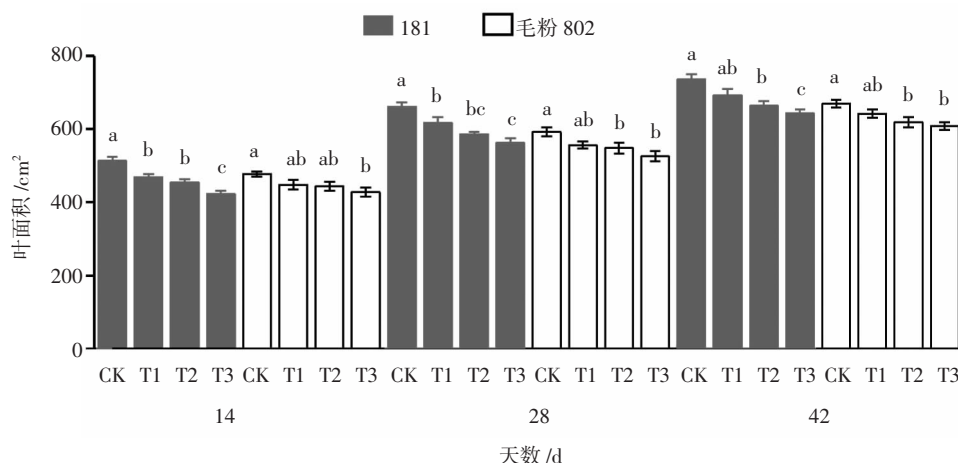


图 3 不同程度水分亏缺处理对番茄叶面积的影响

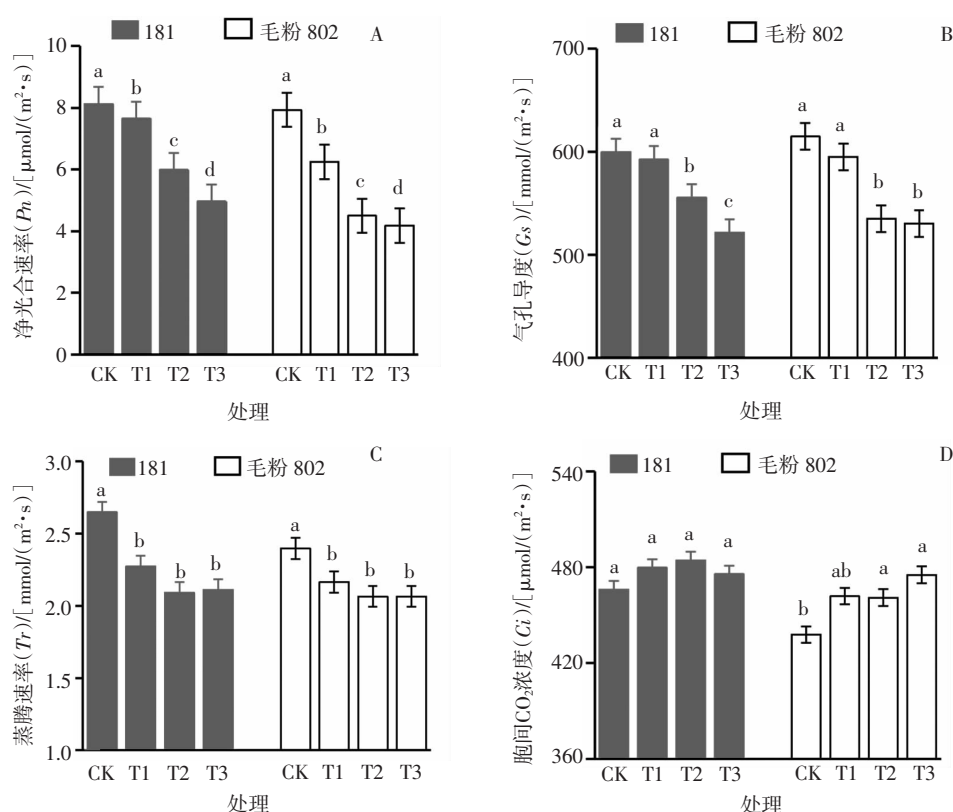


图 4 不同程度水分亏缺处理对番茄植株光合参数的影响

品种 181 和毛粉 802 的净光合速率分别为 4.96、4.18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 分别较 CK 显著降低了 38.99%、47.29%。由图 4B 可见, 2 个番茄品种各处理的气孔导度随灌水量的减少呈降低的趋势。其中 T3 处理下品种 181 和毛粉 802 的气孔导度分别为 521.57、530.60 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 分别较 CK 显著降低了 13.08%、13.71%。由图 4C 可见, 2 个番茄品种的蒸腾速率随灌水量的减少整体呈降低趋势, 表现为 CK 处理显著高于其他处理。T3 处理下品种 181 和毛粉 802 的蒸腾速率分别为 2.11、2.06 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 分别较 CK 显著降低了 20.38%、14.17%。由图 4D 可见, 品种 181 在 T2 处理下胞间 CO_2 浓度最高, 为 484.29 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 较 CK 高 3.92%, 但各处理间无显著性差异; 毛粉 802 各处理胞间 CO_2 浓度由大到小依次为 T3、T1、T2、CK, 其中处理 T3 胞间 CO_2 浓度为 475.19 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 较 CK 显著提高了 8.57%。表明水分亏缺会降低番茄植株净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 且水分亏缺程度越重, 下降越明显; 胞间 CO_2 浓度在一定程度水分亏缺条件下会呈现增加趋势。

2.5 水分亏缺对番茄产量及水分利用效率的影响

如表 2 所示, 2 个品种番茄的单株产量、单果重、折合产量均随灌水量的减少而逐渐降低。2 个番茄品种单株产量和折合产量均表现为 CK 与 T1 处理间差异不显著, 与 T2、T3 处理间差异显著。其中, 品种 181 单株产量 CK 为 3 026.07 g, 折合产量为 79 947.68 kg/hm^2 , T1、T2、T3 处理折合产量分别较 CK 降低了 5.68%、18.80%、34.45%。毛粉 802 单株产量 CK 为 4 872.66 g, 折合产量为 127 614.54 kg/hm^2 , T1、T2、T3 处理折合产量分别较 CK 减产了 5.67%、12.67%、20.35%。品种 181 水分利用效率 T1、T2、T3 处理分别较 CK 增加了

14.65%、25.80%、40.00%, 毛粉 802 在 T1、T2、T3 处理下的水分利用效率分别较 CK 增加了 14.63%、35.28%、70.09%。表明水分亏缺会降低番茄果实的产量, 水分亏缺程度越严重, 减少量越大, 水分利用效率越高。总体来说, 与品种 181 相比, 毛粉 802 的折合产量受水分亏缺影响较小, 水分利用效率更高。

3 讨论与结论

水分亏缺对作物生长有多方面影响, 不同程度、不同时期的缺水都会造成植株不同反应^[9-11]。植物在水分亏缺条件下光合电子传递链活性受到抑制, 影响植物叶片内的 ATP 和 NADPH 产生, 降低了光合速率, 进而影响产量水平^[12]。本研究通过对番茄品种 181 和毛粉 802 在一定时期内进行不同程度水分亏缺处理, 发现在中度和重度水分亏缺条件下, 番茄生长会受到明显抑制, 产量下降显著, 而且水分亏缺程度越重, 减产效果越严重。水分亏缺条件下, 2 个番茄品种在生长特性上存在差异, 随着水分亏缺程度的加重, 2 个品种番茄的株高、茎粗、叶面积均呈下降趋势。水分亏缺条件下, 品种 181 株高和叶面积表现出相对优势, 而毛粉 802 则在茎粗上更为健壮, 然而, 2 个品种株高、茎粗和叶面积均受到水分亏缺的显著影响呈下降趋势, 说明合理控制灌水量对于确保番茄正常生长至关重要。研究发现植株叶片气孔张开度受水分条件影响很大, 一旦过度缺水, 会导致气孔张开度减小^[13]。本研究中, 2 个番茄品种的 P_n 、 Tr 、 G_s 均随灌水量减少而降低, 与刘浩等^[14]番茄叶片光合速率以及气孔开度的研究结果相似。姜凤超等^[15]发现番茄植株叶片的蒸腾速率和光合速率均随灌水量的减少而降低。而在本研究中 C_i 在一定程度水分亏缺条件下会呈现增加

表 2 不同程度水分亏缺处理对番茄产量及水分利用效率的影响

品种	处理	单株结果数 /个	单果重 /g	单株产量 /g	折合产量 /(kg/hm^2)	水分利用效率 /(kg/m^3)
181	CK	25.71±1.06 ab	117.70±3.32 a	3 026.07±133.82 a	79 947.68 a	22.05
	T1	27.14±1.40 a	106.86±6.04 ab	2 900.18±36.90 a	75 406.90 a	25.28
	T2	23.43±1.32 bc	105.40±2.82 ab	2 469.52±106.19 b	64 921.14 b	27.74
	T3	20.29±0.81 c	97.45±4.92 b	1 977.26±139.60 c	52 408.40 c	30.87
毛粉802	CK	19.43±0.72 a	250.78±12.62 a	4 872.66±120.20 a	127 614.54 a	35.20
	T1	19.00±0.65 a	241.29±9.08 ab	4 584.51±84.95 a	120 373.91 a	40.35
	T2	18.86±0.46 a	223.71±3.63 bc	4 219.17±100.86 b	111 443.93 b	47.62
	T3	18.00±0.53 a	214.05±6.50 c	3 852.90±128.45 c	101 644.38 c	59.87

趋势,这可能是因为植物叶片在水分亏缺条件下自身进行适应性调节,采取一系列生理反应导致气孔导度降低,虽然气孔关闭减少了 CO_2 的进入,但由于光合作用的降低(由于水分胁迫导致的光反应和暗反应受阻),植物对 CO_2 的消耗也相应减少。这种消耗的减少与进入的减少之间可能形成一个不平衡,使得胞间 CO_2 浓度相对增加。

水分利用效率是作物产量与获得该产量的耗水量的比值,水分利用效率值越大,说明水分被利用的程度越高,水分被利用的越充分^[16-17]。张国新等^[18]研究发现,随着灌水频次减少,番茄的水分利用效率明显提高。同时,在水分亏缺条件下,番茄植株通过调节叶面积和气孔导度,可以实现叶片光合和蒸腾之间的平衡^[19],从而降低无效蒸腾,提高水分利用效率。相关研究表明,光合参数与土壤含水量状况有关,在适宜的光合有效辐射强度下,水分越充足,净光合速率越大、蒸腾越快^[20]。因此,要避免番茄产量降低,必须通过合理的灌溉管理,降低水分亏缺程度,控制合适的水分条件来保持植株健康和提高产量。在本试验中,181与毛粉802番茄的水分利用效率均随灌水量的减少而增大,且轻度水分亏缺(80%正常灌水量)番茄折合产量与正常灌水量折合产量差异不显著,因此轻度水分亏缺能够满足产量的基本需求和植株的水分利用,可有效实现设施基质栽培番茄生产节水。另外,毛粉802与181相比减产量相对较小,水分利用效率相对较高,更适用于亏缺条件下的栽培生产。

参考文献:

- [1] 姚有华,白羿雄,吴昆仑. 亏缺灌溉对藜麦光合特性、营养品质和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(5): 713-722.
- [2] 刘海涛,齐红岩,刘洋,等. 不同水分亏缺程度对番茄生长发育、产量和果实品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006(3): 414-418.
- [3] 刘晓奇. 水分亏缺对设施基质培番茄果实品质和糖代谢的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [4] 杨振平,刘苑,邓亚鹏. 亏缺灌溉条件下增施硅肥对番茄生长发育及品质的影响研究[J]. 节水灌溉, 2023(10): 68-74.
- [5] 闫润杰. 土壤磷素亏缺下增温对番茄生理特性及水分利用率的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [6] 闫文涛,米兴旺,李波,等. 不同保水剂对戈壁日光温室基质栽培番茄生长和产量及品质的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 342-348.
- [7] 吕剑. 日光温室基质栽培越冬茬番茄灌水下限研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [8] 薛义霞,栗东霞,李亚灵. 番茄叶面积测量方法的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(8): 116-120.
- [9] 常佳悦,马小龙,吴故燃,等. 基质栽培下行距和灌水量对塑料大棚番茄光能和水分利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 111-120; 154.
- [10] 余玲欢,樊怀福. 水分亏缺对番茄生长、产量和果实品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(11): 39-42.
- [11] 王丽娟,马刚,张岚翠. 水分亏缺处理对番茄果实品质及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4499-4500; 4506.
- [12] 王欢. 日光温室番茄对水分亏缺的响应研究[J]. 农业科技与信息, 2020(14): 38-39.
- [13] 宋小园,朱仲元,刘玉金. 老芒麦蒸腾速率及其与响应因子的关系[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 137-140.
- [14] 刘浩,孙景生,段爱旺,等. 温室滴灌条件下水分亏缺对番茄生长及生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 53-57.
- [15] 姜凤超,石磊,李玉欣,等. 水分和锌对番茄叶水势、光合特性及蒸腾效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 125-127.
- [16] 牛晓丽,胡田田,周振江,等. 水肥供应对番茄产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2014(2): 17-21.
- [17] 杨新强,孙建好,李伟绮,等. NBPT和DMPP对陇中半干旱区马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(10): 917-921.
- [18] 张国新,姚玉涛,孙叶烁,等. 水分调控对滨海盐碱地设施番茄及土壤盐分的影响[J]. 北方园艺, 2021(11): 57-62.
- [19] 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(S2): 81-85.
- [20] 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.