

张健利,王振华,宗 睿,等. 水气互作对滴灌加工番茄生长及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 453-461.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.020

水气互作对滴灌加工番茄生长及品质的影响

张健利^{1,2}, 王振华^{1,2}, 宗 睿^{1,2}, 王天宇^{1,2}, 温 越^{1,2}, 陈 睿^{1,2}, 武小荻^{1,2}
(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000; 2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要: 为探明不同加气方式和灌水量互作对北疆滴灌加工番茄生长及产量品质的影响,以及适宜北疆加工番茄滴灌的最佳水气组合模式,设置3种加气方式[物理加气(O1)、不加气(O2)、化学加气(O3)]、4个灌水量水平[5 400 m³/hm² (W1)、4 950 m³/hm² (W2)、4 500 m³/hm² (W3)、4 050 m³/hm² (W4)],共12个处理。物理加气和化学加气使加工番茄产量分别增加8.14%、7.91%,灌溉水分利用效率(IWUE)分别增加4.74%、4.61%。物理加气下,4 950 m³/hm²灌水量处理产量最大,4 500 m³/hm²灌水量处理IWUE最大。物理加气对加工番茄可溶性固形物、番茄红素和V_C含量提升效果最明显,物理加气下,4 500 m³/hm²灌溉水平的加工番茄各项品质指标优于4 950 m³/hm²灌溉水平。为兼顾加工番茄灌溉水分利用效率、产量、果实品质三重需求,物理加气下4 500 m³/hm²灌水量可作为北疆加工番茄滴灌适宜的水气组合模式。

关键词: 加气方式; 灌溉水平; 加工番茄; 产量; 品质

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)02-0453-09

Effects of water and air interaction on growth and quality of drip-irrigated processing tomato

ZHANG Jian-li^{1,2}, WANG Zhen-hua^{1,2}, ZONG Rui^{1,2}, WANG Tian-yu^{1,2}, WEN Yue^{1,2}, CHEN Rui^{1,2}, WU Xiao-di^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China)

Abstract: To explore the effects of different aeration methods and irrigation amounts interaction on the growth and yield of drip-irrigated processing tomato in northern Xinjiang, and the optimal water-air combination mode, three aeration methods (physical aeration, no aeration, chemical aeration) and four irrigation levels (5 400 m³/hm², 4 950 m³/hm², 4 500 m³/hm², 4 050 m³/hm²) were set, and there were 12 treatments in this experiment. Under physical and chemical aeration treatments, tomato yield increased by 8.14% and 7.91%, and irrigation water use efficiency (IWUE) increased by 4.74% and 4.61%, respectively. Under the condition of physical aeration, the yield was highest in the treatment of 4 950 m³/hm² irrigation water, and the IWUE was largest in the treatment of 4 500 m³/hm² irrigation water. Physical aeration

had the most obvious effect on increasing the contents of soluble solids, lycopene and V_C in processed tomatoes. Under the condition of physical aeration, the quality indices of drip-irrigated processing tomato at 4 500 m³/hm² irrigation level were better than those at 4 950 m³/hm² irrigation level. In order to meet the needs of irrigation water use efficiency, yield and fruit quality of processing tomato, the irrigation amount of 4 500 m³/hm² under physical aeration can be used as the suitable water-air combination

收稿日期: 2021-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201506); 兵团科技创新团队项目(2019CB004); 兵团节水灌溉试验计划项目(BTJSSY-201907)

作者简介: 张健利(1995-), 男, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。(E-mail) 1228856528@qq.com

通讯作者: 王振华, (E-mail) wzh2002027@163.com

mode for drip-irrigated processing tomato in northern Xinjiang.

Key words: aeration methods; irrigation level; processing tomato; yield; quality

番茄作为具有多种应用价值和营养价值的蔬菜作物,在世界各国广泛栽培。据联合国粮食及农业组织数据显示,2017 年全球番茄总产量约 1.8×10^8 t^[1]。中国番茄的年产量超过 5.0×10^7 t,是世界最大番茄制品出口国和第三大番茄种植国^[2]。新疆维吾尔自治区作为中国最大的加工番茄主产区,其生产能力约占国内的 90% 以上^[3],种植加工番茄已成为当地农户获取收益的重要来源之一。

番茄对土壤水分含量和土壤通气性较为敏感^[4]。较高的灌溉水平下,土壤水分过多,降低了土壤中氧气的扩散速率^[5]。低氧胁迫下根际无氧呼吸加强,呼吸速率降低,产生的能量无法满足植株正常生长,长期低氧胁迫加剧了根细胞质膜过氧化程度,致使根系活力下降,抑制植株生长^[6]。温改娟等^[7]通过文丘里器对灌溉水进行加气,结果表明,番茄果实产量及品质较不加气处理显著提高。Bhattarai 等^[8]通过在灌溉水中添加过氧化氢并向南瓜根部灌溉,南瓜产量和数量分别提高了 25% 和 29%。程峰等^[9]研究了常规滴灌、化学增氧滴灌和机械增氧滴灌 3 种灌溉方式对香芹生长的影响,结果表明,机械增氧和化学增氧滴灌均有助于香芹的生长。加气灌溉作为一种绿色增产技术,可有效解决低氧胁迫问题,起到增产和改善品质的作用。其中,利用化学试剂加气灌溉的技术简便、快捷,但局限性较强,运输和储存不便,且施用不当可能会对作物造成危害和改变土壤中生物的构成^[10]。利用文丘里器进行加气灌溉时,管道内出现水气分布不均匀现象,且随距离增加灌溉水中气体含量下降^[11],但因其成本相对低廉,对作物无危害,是目前国际上应用较为广泛的加气技术。

膜下滴灌技术已在新疆广泛应用,该技术将覆膜与滴灌技术相结合,具有节水、节肥、提升作物产量的优点。但覆膜条件下阻碍了膜下土壤与周边环境的气体交换^[12],从而造成作物根区的缺氧现象。加气可减缓作物根区缺氧现状,目前主要集中于温室大棚加气的研究^[13]。而在中国新疆干旱地区,加工番茄的种植方式基本为膜下滴灌,对于大田膜下滴灌条件下不同加气方式与不同灌水量相结合的研究鲜有报道。本研究以加工番茄为材料,通过研究

不同加气方式(文丘里加气和过碳酸钠加气)及灌水量对滴灌加工番茄生长和产量品质的影响,探寻适宜新疆膜下滴灌加工番茄的最佳水气组合模式,以期新疆加工番茄加气灌溉提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 5–8 月开展,试验田位于新疆维吾尔自治区石河子市石河子大学试验场农二连($85^{\circ}59'45''\text{E}$, $44^{\circ}19'26''\text{N}$,海拔 412 m),地下水埋深 >8 m,土壤质地属中壤土,0~80 cm 土壤平均容质量为 1.55 g/cm^3 ,年均日照时间为 2 950 h,多年平均降雨量、蒸发量分别为 207 mm 和 1 660 mm。

1.2 试验材料

选用当地常规加工番茄品种 3166,试验于 5 月 4 日移苗定植,8 月 23 日收获采摘,全生育期为 112 d。栽植模式采用“1 膜 2 管 4 行”,地膜为常规聚乙烯塑料地膜,宽 1.45 m,滴灌管采用以色列制造的耐特菲姆滴灌管,滴灌管埋深 15 cm,毛管间距 0.85 m,滴头间距 0.30 m,滴头流量 3.2 L/h ,加工番茄行距 0.35 m,株距 0.40 m。试验所用加气施肥设备由蓄水池、 1.5 m^3 水桶、水泵、压力表、回流管、Mazzei1078 型文丘里射流器、旋翼式水表、施肥罐和输配水管道系统组成。

1.3 试验设计

根据前人研究结果和当地生产实践^[3,14],制定加工番茄灌溉、施肥制度(表 1)。试验设 3 种加气方式:物理加气(O1),不加气(O2),化学加气(O3);4 个灌水量水平: $5\,400 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W1)、 $4\,950 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W2)、 $4\,500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W3)、 $4\,050 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W4)。采用 2 因素完全随机设计,共 12 个处理,每个处理 3 次重复,每处理试验小区面积为 26.65 m^2 ($13.00 \text{ m} \times 2.05 \text{ m}$),试验设计见表 2。施肥量为:尿素 $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (N:46.4%),氯化钾 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (K_2O :57%),磷酸一铵 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (P_2O_5 :60.5%),各处理施肥量均相同。物理加气方式为:采用文丘里射流器(型号为 Mazzei1078)进行加气,通过文丘里射流器将空气溶解在灌溉水中并以水气混合液的

形式进行灌溉,当灌水压力为 0.1 MPa 时制成的掺气水掺气比例约为 15%,对应水中溶解氧质量浓度约为 15 mg/L^[15]。化学加气方式为:采用固体过碳酸钠进行增氧,灌溉前将水储存在 1.5 m³的水桶内,灌溉时将固体过碳酸钠加入水桶中,水中溶解氧的浓度用哈希水质监测仪 HQ30D 实时测定,每隔 10 min 测定水桶中的含氧量变化。水中溶解氧初始质量浓度为 8.375 mg/L,加过碳酸钠后保证其质量浓度大于初始值的 10%,通过预试验测定,溶解氧质量浓度可保持在 9.256 mg/L 左右,若不满足灌溉水溶解氧质量浓度,停止灌溉及时增氧。不加气方式为:地下滴灌模式。

表 1 加工番茄灌溉、施肥制度

Table 1 Irrigation and fertilization schedule of processing tomato

生长阶段	日期	灌溉、施肥 周期(d)	灌溉、施肥 次数	灌溉、施肥 比例(%)
苗期	05-04-06-08	36	1	12.5
花期	06-09-06-30	22	2	25.0
果实膨大一期	07-01-07-20	20	2	25.0
果实膨大二期	07-21-08-03	14	2	25.0
成熟期	08-04-08-23	20	1	12.5
全生育期	05-04-08-23	112	8	100.0

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	灌溉定额 (m ³ /hm ²)	加气方式
W101	5 400	物理加气
W102	5 400	不加气
W103	5 400	化学加气
W201	4 950	物理加气
W202	4 950	不加气
W203	4 950	化学加气
W301	4 500	物理加气
W302	4 500	不加气
W303	4 500	化学加气
W401	4 050	物理加气
W402	4 050	不加气
W403	4 050	化学加气

1.4 试验观测内容及方法

1.4.1 株高、茎粗 在植株各生长阶段末,每小区

随机挑选 9 株测定,并做标记,用卷尺从植株基部测量其株高,用电子游标卡尺量取植株地面之上 2 cm 处的茎干直径。

1.4.2 光合指标 在各生长阶段的晴朗天气下于当日的 11:00-13:00 时段,采用 LI-6800 全自动便携式光合仪测定植株功能叶光合特性指标。每小区随机挑选 3 株植株进行测量并取平均值,测定植株顶部第 2 片完全展开叶。测定指标包括气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、净光合速率(A)和蒸腾速率(E)。

1.4.3 产量、品质 产量测定:在加工番茄成熟收获期,每小区挑选 9 株测定其产量,测定项目包括单株产量和果实数量,采用精度为 0.01 g 的电子秤称量单果质量。灌溉水分利用效率(WUE)的计算公式为: $WUE=Y/I$,式中, Y 和 I 分别为对应处理的加工番茄总产量(kg/hm²)和总灌水量(m³/hm²)。品质测定:加工番茄成熟收获期每小区挑选 6 个果实用于品质测定。可溶性固形物和番茄红素含量分别采用手持折光仪^[16](型号为 RHBO-90)和紫外-可见分光光度计(型号为 EV300PC)测定^[17]。维生素 C、有机酸和可溶性糖含量分别采用滴定法^[17]、碱滴定指示剂法^[17]和蒽酮比色法测定^[18]。

1.5 数据分析

基于 Excel 2016 进行试验数据处理与计算分析,采用 Origin 2019 进行作图,应用 Spss Statistics 26 法检验处理间的差异显著性。

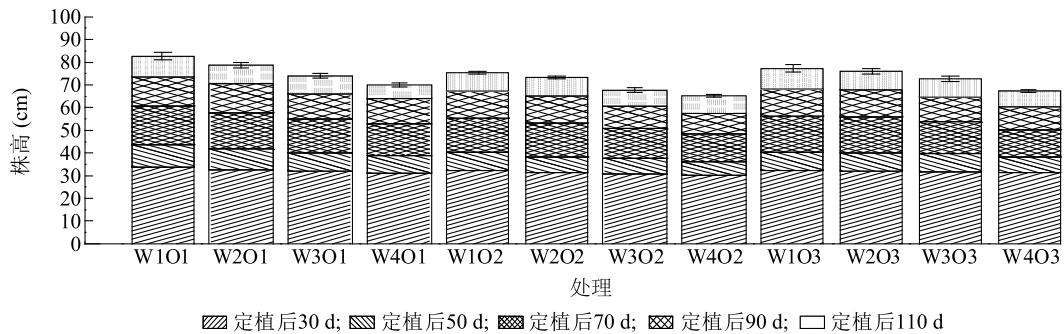
2 结果与分析

2.1 水气互作对加工番茄生长的影响

由图 1、图 2 可知,不同水气互作处理下,加工番茄株高、茎粗在各个生长阶段变化规律相似,均随灌水量的增大而增加。移植后 50~70 d,该阶段为果实膨大一期,株高增长幅度最大,为 0.73 cm/d。随日期叠加,加工番茄由营养生长转变生殖生长,株高增幅下降。移植后 112 d,加工番茄株高在 W1 处理下最大,W1 处理较 W2、W3、W4 处理株高分别增加 3.20%、9.74%和 16.14%。物理和化学加气处理均有助于株高的增长,与不加气相比,物理和化学加气处理株高分别增加 8.45%和 4.15%。与不同灌溉水平下不加气处理相比,物理加气下 W1、W2、W3、W4 灌溉水平处理株高分别增加 9.83%、9.37%、9.31%和 7.20%,化学加气下 W1、W2、W3、

W4 灌溉水平处理株高分别增加 2.66%、3.68%、7.39% 和 3.06%。移植后 70~90 d, 加工番茄茎粗增长幅度最大, 为 0.13 mm/d。移植后 112 d, W1 处理下加工番茄茎粗最大, W1 处理较 W2、W3、W4 处理茎粗分别增加 3.24%、6.83% 和 10.38%。物理和化学加气处理均有助于茎粗的增长, 与不加气处理相比, 物理和化学加气处理茎粗分别增加 6.47% 和

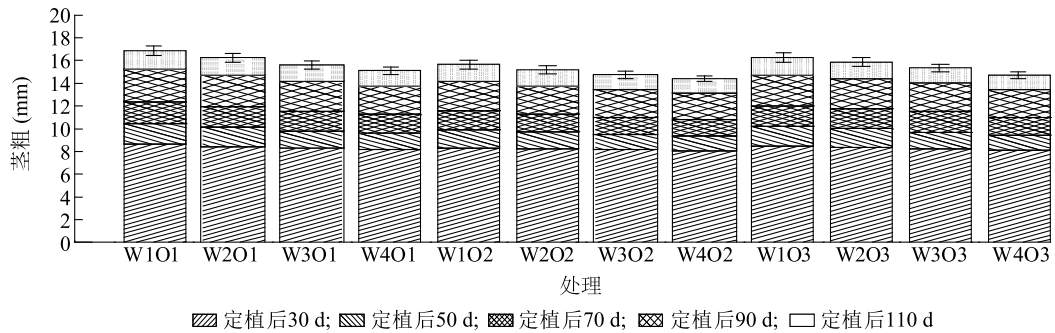
3.70%。与不同灌溉水平下不加气处理相比, 物理加气下 W1、W2、W3、W4 处理茎粗分别增加 7.73%、7.05%、5.9% 和 4.93%, 化学加气下 W1、W2、W3、W4 处理茎粗分别增加 3.90%、4.61%、4.07% 和 2.08%。以上结果表明, 物理加气方式对加工番茄株高、茎粗的提升效果优于化学加气方式, W1 灌溉水平下, 加工番茄株高、茎粗增幅效果最好。



各处理见表 2。

图 1 不同水气交互处理对加工番茄株高的影响

Fig.1 Effects of water and air interaction on plant height of processing tomato



各处理见表 2。

图 2 不同水气交互处理对加工番茄茎粗的影响

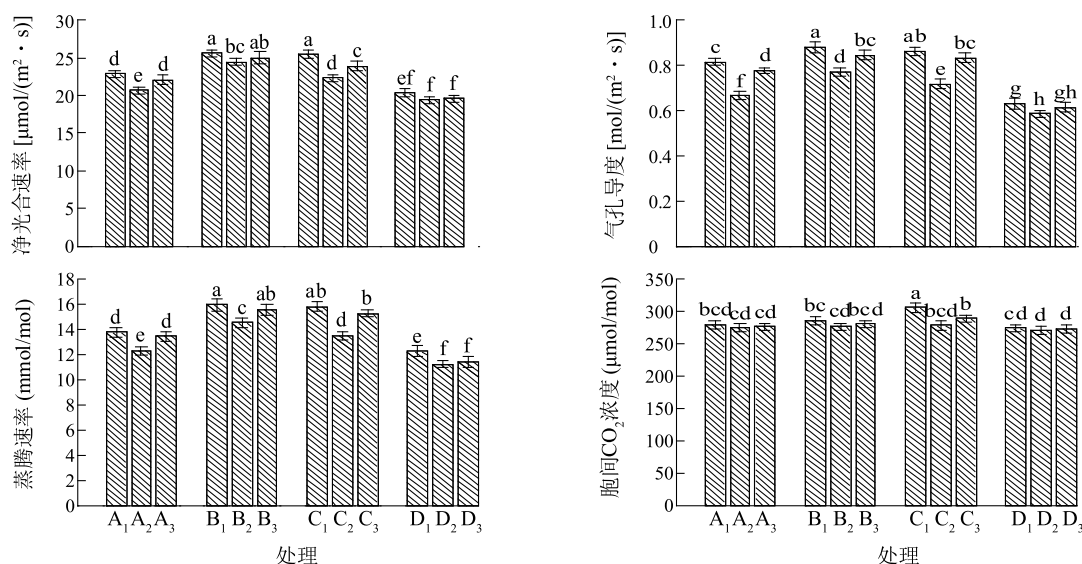
Fig.2 Effects of water and air interaction on stem diameter of processing tomato

2.2 水气互作对加工番茄光合参数的影响

图 3 显示, 加工番茄净光合速率(A)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(E)均随灌水量的增加呈先增大后减少的趋势, 且均在 W2 灌溉水平下达到峰值。W2 处理较 W1、W3、W4 处理净光合速率分别增加 14.37%、4.78% 和 26.40%, 气孔导度分别增加 10.67%、3.75% 和 36.07%, 蒸腾速率分别增加 16.49%、3.22% 和 31.85%。胞间 CO_2 浓度(C_i) 在 W3 灌溉水平下达到最大值, W3 处理较 W1、W2、W4 处理胞间 CO_2 浓度分别增加 5.06%、3.53% 和 6.67%。物理加气 and 化学加气促进了加工番茄叶片

光合指标的增加, 与不加气处理相比, 物理加气下加工番茄的气孔导度(G_s)、净光合速率(A)、蒸腾速率(E) 和胞间 CO_2 浓度(C_i) 分别提高了 16.35%、8.43%、12.06% 和 4.01%, 化学加气下相应指标分别提高了 11.82%、4.19%、8.04% 和 1.58%。W3 灌溉水平和加气条件下, 加工番茄叶片的 A 、 G_s 、 E 、 C_i 提升效果最好, 且物理加气效果优于化学加气效果。

上述结果说明, 加气可不同程度提高加工番茄各项光合指标, 且物理加气效果高于化学加气效果。提升加工番茄光合作用的最适宜灌溉水量为 4 950 m^3/hm^2 , 过高或过低均抑制光合作用。



A₁: W1O1; A₂: W1O2; A₃: W1O3; B₁: W2O1; B₂: W2O2; B₃: W2O3; C₁: W3O1; C₂: W3O2; C₃: W3O3; D₁: W4O1; D₂: W4O2; D₃: W4O3。各处理见表2。不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图3 不同水气互作处理对加工番茄膨大期叶片光合参数的影响

Fig.3 Effects of water and air interaction treatments on photosynthetic parameters of processing tomato leaves during expansion stage

2.3 水气互作对加工番茄产量和灌溉水利用效率 (IWUE) 的影响

不同水气互作处理对加工番茄产量、IWUE 的影响如表3所示。随着灌水量的增加,加工番茄产量呈先增大后降低的趋势,W2 灌溉水平下产量达到最高,W2 处理较 W1、W3、W4 处理产量分别提升了 13.03%、4.25%与 33.42%。W4 灌溉水平下,不同加气处理之间产量无显著差异 ($P > 0.05$)。与不加气处理相比,物理和化学加气处理产量分别提升了 8.14% ($P < 0.01$) 和 4.74% ($P < 0.01$)。物理加气下,W1 处理产量提升最为显著,与不加气处理相比,加工番茄产量提升 12.12%。物理加气下,W2O1 处理与 W3O1 处理的产量无显著差异。

随灌水量的增加加工番茄 IWUE 先增大后减少,W1 处理较 W2、W3、W4 处理 IWUE 分别减少 18.19%、2.46%和 10.67%,W3 灌溉水平下加工番茄 IWUE 最优。与不加气处理相比,物理和化学加气处理 IWUE 分别提升了 7.91% ($P < 0.01$) 和 4.61% ($P < 0.01$)。较不加气处理相比,物理加气处理的加工番茄 IWUE 提高了 3.74%~12.14%,化学加气处理的加工番茄 IWUE 提高了 2.68%~7.81%。

由以上结果可知,W2 灌溉水平下加工番茄产量最高,W3 灌溉水平下 IWUE 最高,W2O1 处理产量最大,W3O1 处理 IWUE 最大。

表3 不同水气互作处理下加工番茄产量和灌溉水利用效率

Table 3 Yield and irrigation water use efficiency under different water and air interaction treatments

处理	产量 (t/hm^2)	灌溉水利用效率 IWUE (kg/m^3)
W1O1	170.57±7.25de	31.59±1.34f
W1O2	152.13±1.08g	28.17±0.20h
W1O3	164.00±2.26f	30.37±0.42g
W2O1	186.44±2.91a	37.66±0.59bc
W2O2	177.02±3.09bc	35.76±0.62d
W2O3	181.78±2.58ab	36.72±0.52cd
W3O1	183.31±3.21a	40.73±0.71a
W3O2	165.11±1.04ef	36.69±0.23cd
W3O3	174.60±5.94cd	38.80±1.32b
W4O1	138.31±2.54h	34.15±0.63e
W4O2	133.33±1.40h	32.92±0.35e
W4O3	137.02±2.70h	33.83±0.66e

各处理见表2。同列数据标有不同字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4 水气互作对加工番茄各品质指标的影响

结果表明,水分因素和加气因素对加工番茄各品质指标均具有极显著影响 ($P < 0.01$),水气交互作用对有机酸、可溶性固形物、番茄红素和维生素 C (V_C) 含量影响极显著 ($P < 0.01$)。不加气条件下,

随灌水量的增加加工番茄的有机酸、可溶性固形物、可溶性糖和维生素 C 含量均有所降低。W1O2 处理较 W4O2 处理有机酸、可溶性固形物、可溶性糖和 V_C 含量分别降低了 38.63%、24.51%、17.84% 和 14.39%。W3O2 处理番茄红素含量最高, W1O2 处理最低, W3O2 处理较 W1O2 处理显著增大 21.33%。物理加气和化学加气处理均可不同程度提升加工番茄各品质指标含量, 与不加气处理相比, 物理加气处理有机酸、可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素和 V_C 含量分别提升了 12.67%、10.29%、3.70%、34.45% 和 8.60%, 化学加气处理相应指标分别提升 33.22%、2.67%、8.23%、18.73% 和

3.96%。对加工番茄产量和 $IWUE$ 的分析结果表明, 物理加气处理下, W2 灌溉水平产量最高, W3 灌溉水平 $IWUE$ 最高。因此对物理加气处理的 W2 和 W3 灌溉水平处理进行各品质指标分析, 结果表明物理加气条件下, W3O1 处理较 W2O1 处理有机酸、可溶性固形物、可溶性糖、番茄红素和 V_C 含量分别增大了 18.99%、0.73%、8.61%、14.82% 和 10.22% (表 4)。

由上述分析结果可知, 物理加气处理对提高加工番茄品质的效果最为明显 (有机酸、可溶性糖含量除外), 物理加气条件下, W3 灌溉水平处理各品质指标优于 W2 灌溉水平处理。

表 4 不同水气互作处理对加工番茄品质的影响

Table 4 Effects of water and air interaction on the quality of processing tomato

处理	有机酸含量 (%)	可溶性固形物含量 (%)	可溶性糖含量 (%)	番茄红素含量 ($\mu\text{g/g}$)	维生素 C 含量 (mg/kg)
W1O1	2.26 \pm 0.17f	4.55 \pm 0.05e	2.28 \pm 0.08ef	10.35 \pm 0.13de	104.3 \pm 0.7e
W1O2	2.24 \pm 0.10f	4.22 \pm 0.14f	2.21 \pm 0.07f	8.11 \pm 0.06h	95.2 \pm 0.9g
W1O3	2.72 \pm 0.13e	4.32 \pm 0.11f	2.45 \pm 0.13de	9.46 \pm 0.09g	101.4 \pm 0.4f
W2O1	3.16 \pm 0.15d	5.50 \pm 0.12b	2.44 \pm 0.15de	11.81 \pm 0.19c	106.7 \pm 1.1d
W2O2	2.82 \pm 0.14e	4.72 \pm 0.16de	2.32 \pm 0.07ef	8.25 \pm 0.17h	102.4 \pm 0.6f
W2O3	3.72 \pm 0.15bc	4.82 \pm 0.08d	2.55 \pm 0.10bcd	10.27 \pm 0.09e	103.9 \pm 1.6e
W3O1	3.76 \pm 0.21bc	5.54 \pm 0.11b	2.65 \pm 0.08abc	13.56 \pm 0.45a	117.6 \pm 1.1b
W3O2	2.98 \pm 0.16de	4.91 \pm 0.16d	2.51 \pm 0.10cd	9.84 \pm 0.06f	105.2 \pm 1.3e
W3O3	4.45 \pm 0.18a	5.21 \pm 0.11c	2.76 \pm 0.03a	12.23 \pm 0.15b	112.4 \pm 0.2c
W4O1	3.96 \pm 0.20b	5.85 \pm 0.07a	2.72 \pm 0.07ab	12.52 \pm 0.13b	121.0 \pm 0.5a
W4O2	3.65 \pm 0.17c	5.59 \pm 0.13b	2.69 \pm 0.09abc	9.66 \pm 0.25g	111.2 \pm 0.3c
W4O3	4.68 \pm 0.12a	5.61 \pm 0.12b	2.76 \pm 0.12a	10.63 \pm 0.05d	112.6 \pm 0.7c

各处理见表 2。同列数据标有不同字母表示处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 水气互作对加工番茄生长、生理的影响

株高、茎粗能够反映植株的生长发育和营养状况。本研究结果表明, 在不加气处理中, 随灌水量的增加, 加工番茄株高、茎粗表现出逐渐递增的趋势, 这是由于充足的水分有利于促进植株根系对矿质元素的吸收, 从而促进植株的新陈代谢, 加快营养生长^[19]。低氧胁迫导致根际无氧呼吸加强, 有氧呼吸降低, 致使根系活力下降, 产生的能量无法满足植株正常生长, 最终抑制植株生长^[6]。本试验中, 通过加气促进了各梯度灌溉水平下株高、茎粗的生长, 这是由于在灌水过程中输入氧气, 增大了土壤溶解氧

浓度, 改善了土壤中氧化还原电位和氧气扩散速率, 提高了土壤通气性^[20-21], 缓解了作物根系缺氧状况, 有效提高了根系活力, 促进了根系对养分的吸收利用^[22], 进而促进了植株生长。

气孔因素和叶肉细胞光合活性控制着叶片光合作用^[23-25], 气孔导度降低将影响到光合速率^[26]。本试验中, 在高灌溉水量下, 气孔导度、蒸腾速率及净光合速率反而下降, 这可能是由于土壤水分过多、通气不良妨碍了根系活动, 从而间接影响了光合作用的正常进行^[27]。另外, 本研究结果显示, 低水量条件下植物叶片通过关闭气孔减少水分的蒸腾损失^[28], 同时也降低了植物对光能的吸收, 进而抑制了光合作用的进行, 这与李银坤等^[29]研究结果相

似,即水分过低对光合作用具有明显的负作用。有研究者指出,加工番茄的光合作用受脱落酸(ABA)含量影响,植物体内的ABA可通过减轻细胞膜的破损,提高叶片的保水性增强植物的抗逆性能^[30]。非加气灌溉处理中,根区受到低氧胁迫,导致根部合成大量的ABA,并通过蒸腾流运输到地上部叶片后,保卫细胞附近的ABA浓度上升,导致气孔关闭,该过程造成外界CO₂进入叶片内部受阻,叶片内CO₂供应不足,光合反应速率降低^[31]。而加气灌溉缓解了根系低氧胁迫^[32],从而使植株体内ABA含量下降,叶片气孔导度提高^[33],进而提高了光合作用的各项指标。

3.2 水气互作对加工番茄产量、IWUE 及品质的影响

本试验中,加工番茄产量随灌水量的增加呈先增后减趋势,在W2灌水量水平下产量达到最大。W1高灌水量条件下(5 400 m³/hm²),加工番茄产量较低,这是由于灌水量过多造成植株营养生长旺盛、植株徒长现象严重,进而抑制了植株的生殖生长,导致产量降低,这与李元等^[34]研究结果一致。本试验灌溉水分利用效率(IWUE)随灌水量的递增呈现先增后减趋势,这可能是因为当灌水过多时,番茄根系对水分的吸收速率下降,从而影响了IWUE的提高。有研究者指出,在一定灌水量范围内,IWUE随着灌水量的减少而增大^[35]。在本试验中W3水平下灌溉水分利用效率达到最大。本试验通过物理加气和化学加气,均使产量和灌溉水分利用效率得到提升,这是由于加气能够调控土壤中的水气比例,增大土壤充气孔隙度和氧气含量^[36],提升了土壤微生物和作物根系呼吸能力^[37],促进了根系养分吸收^[38]和吸水能力^[39],进而影响植株的生长,使产量与灌溉水分利用效率提高。

本研究结果表明,不加气情况下,随着灌水量的增加,加工番茄果实中有机酸、可溶性固形物、维生素C、可溶性糖等含量下降,这是因为水分对番茄果实中营养物质有稀释作用,从而降低番茄果实风味品质^[40],这与May等^[41]研究结果相似。作物的产量和品质是相互矛盾的,随着产量提高品质会不同程度下降^[42],这与本试验研究结果相似,本试验中W2处理的产量高,但W3处理的番茄品质各项指标高于W2处理。因此,可以通过适度的降低灌溉量来提升加工番茄的品质。根系缺氧会导致根系对水

分的传导能力下降,降低光合酶活性和加速叶绿素降解,抑制植物生长,降低果实品质^[43]。本试验通过不同加气方式,改善了根际氧环境,促进了植株生理功能的正常运转,从而使加工番茄各项品质指标得以提升,加气处理较不加气处理提高了可溶性糖、有机酸、可溶性固形物、维生素C等含量,这与王振华等^[44]研究结果相似,其中物理加气效果整体优于化学加气效果。

3.3 不同水气组合处理及加气方式效果的探讨

在加工番茄苗期,由于植株生长弱小,对氧的需求量较少,根际气体对植株的影响不占主导地位^[45],且该期灌水周期长、灌水次数少,植株受低氧胁迫的作用不明显,因此在苗期可以考虑不加气。在成熟期,由于植株根系活力下降,受土壤根际通气影响的敏感度下降^[46],且该时期灌水次数减少,受低氧胁迫的程度减弱,故该时期同样可采取不加气处理。但在膨大期,植株根系旺盛,根系吸水能力加强,且灌水周期短、灌水次数频繁,植株对氧气的需求量增大,根际持续性缺氧对植株的影响越来越显著^[45],因此,该时期应保证必要的加气。本试验中,W1灌溉水平下加气处理的植株长势最好,但该水气组合下产量并非最高,这是由于在该灌溉水平下加气使植株营养生长过盛而生殖生长受阻,造成严重的植株徒长现象,故该组合并非最优水气组合处理。W2、W3灌溉水平与物理加气组合W2O1处理与W3O1处理产量无显著性差异,但W3O1处理IWUE最大和品质最优,因此考虑到产量、品质及IWUE三重需求,在新疆干旱少雨情况下,适当降低灌溉定额结合物理加气是可行的灌溉方案,W3灌溉水平下物理加气是最为适宜的水气组合方案。

本研究中,物理加气和化学加气对加工番茄生长、产量和品质的影响不同,可能因为化学试剂过碳酸钠产生的钠离子对根系造成胁迫使其吸水能力下降^[47],从而影响根系的生理代谢,造成其对植株生长、产量及品质等方面的作用下降。另一方面,物理方式加气水中的溶氧量大于化学方式加气水中的溶氧量,提高土壤含氧量会更好满足植物根系生长对根际微环境的要求,提高氮素利用率^[48]。臧明等^[49]研究指出,番茄的产量、品质与溶解氧浓度等呈显著正相关关系,一定范围内溶解氧量越大越有利于植株的生长发育。因此,若在不同加气方式下保证相同的溶解氧浓度,研究结果是否有差异,有待

进一步探究。

4 结论

本试验研究了不同水气处理对加工番茄产量、灌溉水利用效率及品质的影响,得到以下结论:1)只有适宜的灌水量和加气才能促进光合作用使产量达到最大,光合作用及产量在物理加气与4 950 m³/hm²灌溉水平组合下达到最大。2)灌溉水分利用效率在物理加气与4 500 m³/hm²灌溉水平组合下达到最大。物理加气条件下,4 500 m³/hm²灌溉水平的加工番茄各项品质指标优于4 950 m³/hm²灌溉水平。综上所述,基于新疆干旱少雨状况,为达到节水目的,在综合评估产量、灌溉水利用效率及品质后,建议物理加气下4 500 m³/hm²灌水量可作为适宜北疆加工番茄滴灌的水气结合模式。

参考文献:

- [1] SENGAR A S, RAWSON A, MUTHIAH M, et al. Comparison of different ultrasound assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 61:104812.
- [2] 张桂芬,刘万学,万方浩,等. 世界毁灭性检疫害虫番茄潜叶蛾的生物生态学及危害与控制[J]. *生物安全学报*, 2018, 27(3): 155-163.
- [3] 杨玉珍,孟超然,张新疆,等. 氮、钾肥用量对膜下滴灌加工番茄产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, 54(1): 61-67.
- [4] BRADFORD K J, YANG S. Physiological responses of plants to waterlogging[J]. *HortScience*, 1981, 16(1): 25-30.
- [5] 赵旭,李天来,孙周平. 番茄基质通气栽培模式的效果[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 74-78.
- [6] 徐春梅,陈丽萍,王丹英,等. 低氧胁迫对水稻幼苗根系功能和氮代谢相关酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1625-1634.
- [7] 温改娟,蔡焕杰,陈新明,等. 加气灌溉对温室番茄生长和果实品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 113-118, 124.
- [8] BHATTARAI S P, MIDMORE D J, PENDERGAST L P. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26: 439-450.
- [9] 程峰,姚帮松,肖卫华,等. 不同增氧滴灌方式对香芹生长特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 91-94.
- [10] 雷宏军,胡世国,潘红卫,等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 297-308.
- [11] BHATTARAI S P, BALSYS R J, WASSINK D, et al. The total air budget in oxygenated water flowing in a drip tape irrigation pipe [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 52: 121-130.
- [12] 谢恒星,吕海波,高志勇,等. 加氧灌溉下温室甜瓜生长、品质和产量特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(12): 20-24.
- [13] 常双梅,常周梅. 加气灌溉对土壤与作物的影响研究进展[J]. *农业科技与信息*, 2019(5): 49-52, 54.
- [14] 窦允清,王振华,张金珠,等. 水肥耦合对滴灌加工番茄生理生长及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(7): 124-129.
- [15] 徐建新,臧明,雷宏军,等. 增氧灌溉对盆栽冬小麦生长及土壤通气性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4): 16-25.
- [16] 陈秀香,马富裕,方志刚,等. 土壤水分含量对加工番茄产量和品质影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2006(4): 1-4.
- [17] 张连富,丁霄霖. 番茄红素简便测定方法的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2001, 27(3): 51-55.
- [18] 魏守辉,肖雪梅,钟源,等. 日光温室不同时段补光对番茄果实品质及挥发性物质影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 188-196.
- [19] 房祥吉,姜远茂,彭福田,等. 灌水量对盆栽平邑甜茶生长与¹⁵N吸收、利用和损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 76-78, 122.
- [20] 徐建新,臧明,雷宏军,等. 增氧灌溉对盆栽冬小麦生长及土壤通气性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4): 16-25.
- [21] 臧明,雷宏军, BHATTARAI S, 等. 不同增氧滴灌方式对蔬菜生长生理指标的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(3): 310-317.
- [22] 胡德勇,廖健程,陈哲,等. 控制灌溉增氧对超级稻生理生化特性及水分利用效率的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(5): 500-505.
- [23] 吕广德,殷复伟,王超,等. 不同播种量对小麦泰科麦33干物质积累转运、旗叶光合特性及产量构成的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(1): 16-28.
- [24] 黄晓露,赵志珩,廖健明,等. 不同嫁接方法对4种板栗幼树内源激素及光合特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(6): 1384-1391.
- [25] 曹帅,杜仲阳,刘鹏,等. 碱胁迫对大豆光合特性及内源激素含量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(2): 284-291.
- [26] 李卫民,周凌云. 水肥(氮)对小麦生理生态的影响(II)水肥(氮)对小麦叶片细胞间隙CO₂浓度和气孔导度的影响[J]. *土壤通报*, 2004(3): 271-274.
- [27] 段萌,杨伟才,毛晓敏. 覆膜和水分亏缺对春小麦光合特性影响及模型比较[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 219-227.
- [28] 权雪,张石宝. 水分对药用兰科植物白及生理和形态结构的影响[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(3): 370-380.
- [29] 李银坤,武雪萍,吴会军,等. 水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 122-129.
- [30] 张烈,沈秀瑛,孙彩霞,等. ABA与玉米抗旱性关系的研究[J]. *玉米科学*, 1998(S1): 42-44.
- [31] MANCUSO S, SHABALA S. Waterlogging signalling and tolerance in plants[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [32] CHEN X M, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of

- oxygenation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(4): 236-248.
- [33] 李元,牛文全,吕望,等. 加气灌溉改善大棚番茄光合特性及干物质积累[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 125-132.
- [34] 李元,牛文全,许健,等. 加气滴灌提高大棚甜瓜品质及灌溉水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 147-154.
- [35] 安顺伟,王永泉,李红岭,等. 灌水量对日光温室番茄生长、产量和品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(3): 188-192.
- [36] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(3): 278-288.
- [37] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉改善土壤通气性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 163-172.
- [38] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Oxygenation of clayey soils by adding hydrogen peroxide to the irrigation solution: Lysimetric experiments[J]. *Rhizosphere*, 2016, 2: 1-11.
- [39] 卢泽华,蔡焕杰,王健,等. 不同生育时期根际加气对温室番茄生长及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(7): 1330-1337.
- [40] 冯腾腾,周啸尘,郁娅池,等. 灌水量对大棚番茄产量与品质的影响[J]. *北方园艺*, 2016, 40(10): 54-58.
- [41] MAY D M, GONZALES J, BIECHE B J. Irrigation and nitrogen management as they Affect fruit quality and yield of processing tomatoes[J]. *Acta Horticulturae*, 1994, 376: 227-234.
- [42] YASUYOSHI H T, TOSHIKO T B, SATORU K D, et al. The effect of water stress on the growth, sugar and nitrogen content of cherry tomato fruit[J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1998 67(5): 759-766.
- [43] 刘义玲,李天来,孙周平,等. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜光合作用、产量和品质的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(10): 1465-1472.
- [44] 王振华,陈潇洁,吕德生,等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 66-75.
- [45] 牛文全,郭超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2785-2791.
- [46] 郭超,牛文全. 根际通气对盆栽玉米生长与根系活力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(6): 1194-1198.
- [47] 却志群,沈春修,陈林. NaCl 胁迫对莴苣种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2013(9): 12-15.
- [48] 吴龙龙,田仓,张露,等. 稻田水氮氧环境因子对水稻生长发育、光合作用和氮利用的调控研究进展[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1498-1508.
- [49] 臧明,雷宏军,潘红卫,等. 增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 109-118.

(责任编辑:张震林)