

水、肥、气耦合滴灌对温室番茄 生长和品质的影响

雷宏军¹,肖哲元¹,肖 让²,杨宏光¹,潘红卫¹

(1.华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046;2.河西学院土木工程学院,甘肃 张掖 734000)

摘 要:以温室番茄为对象,采用地下滴灌的供水方式,设置施氮量(低氮和常氮)、掺气处理(非曝气和循环曝气)和灌水量(低水量和高水量)3因素2水平随机区组试验,研究水、肥、气耦合滴灌对温室番茄生长与品质的影响。结果表明:循环曝气、高水量和常氮处理可有效促进番茄生长,表现为叶绿素含量增加和净光合速率增强,番茄地上部鲜重、产量提高和品质提升。其中株高和叶绿素含量曝气处理较非曝气处理平均增加9.81%和8.63% ($P<0.05$),高水量处理较低水量处理平均增加18.14%和11.44% ($P<0.05$),常氮处理较低氮处理平均增加6.58%和8.20% ($P<0.05$)。就地上部鲜重和产量而言,曝气处理较非曝气处理平均提高14.93%和22.91% ($P<0.05$),高水量处理较低水量处理平均提高27.10%和41.19% ($P<0.05$),常氮处理较低氮处理平均提高24.89%和40.87% ($P<0.05$)。株高、叶绿素含量、净光合速率与产量均呈极显著正相关 ($P<0.01$)。可溶性固形物、Vc含量、可溶性蛋白质含量,曝气处理较非曝气处理平均提高16.73%、12.13%、11.59%,总酸含量平均降低11.44% ($P<0.05$);高水量处理较低水量处理平均提高16.09%、17.60%、18.99%,总酸含量平均降低16.38% ($P<0.05$);常氮处理较低氮处理平均增加12.65%、41.81%、28.03%,总酸含量平均降低7.97% ($P<0.05$)。本试验中,常氮高水量循环曝气处理(施氮量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,灌水量为 $1\,237\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,掺气比率为15%)是促进温室番茄生长和品质提升的适宜水、肥、气组合方案。

关键词:温室番茄;水、肥、气耦合滴灌;土壤通气状况;生长;光合;产量;品质

中图分类号:S641.2;S626;S275.6 文献标志码:A

Effect of water-fertilizer-gas coupled drip irrigation on greenhouse tomato growth and fruit quality

LEI Hongjun¹, XIAO Zheyuan¹, XIAO Rang², YANG Hongguang¹, PAN Hongwei¹

(1.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power,

Henan Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Zhengzhou, Henan 450046, China;

2.College of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: A two-level randomized block experiment was conducted under greenhouse tomato cultivation with three factors including 2 nitrogen (N) application rates ($135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 2 drip irrigation types (subsurface drip irrigation with conventional water and aerated water), and irrigation rates ($824\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ and $1\,237\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) to study the effects of water-fertilizer-gas coupled drip irrigation on tomato growth and fruit quality. The results showed that continuous aeration, high irrigation rate, and conventional N treatment promoted tomato growth, increased chlorophyll content and photosynthetic rate, improved tomato yield, fresh weight, and fruit quality. The aeration treatments increased by 9.81% and 8.63%, respectively, compared to the conventional drip irrigation ($P<0.05$), and the high irrigation rates increased tomato plant height and chlorophyll content 18.14% and 11.44%, respectively, compared to the low irrigation rates ($P<0.05$). The normal N application rate increased tomato plant height and chlorophyll content by 6.58% and 8.20%, respectively, compared to the low N application rate ($P<0.05$). For aboveground fresh weight and yield, the aeration treatments increased them by 14.93% and

收稿日期:2019-10-27

修回日期:2020-08-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079052, U1504512, 41771256);山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY010710)

作者简介:雷宏军(1975-),男,湖北大冶人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hj_Lei2002@163.com

通信作者:肖让(1979-),男,甘肃泾川人,副教授,主要从事水利工程研究。E-mail: xiaorang999@163.com

22.91%, respectively, compared to the conventional drip irrigation ($P<0.05$), and the high irrigation rates increased by 27.10% and 41.19%, respectively, compared to the low irrigation amount ($P<0.05$), and the normal N application rate increased them by 24.89% and 40.87%, respectively, compared to the low N application rate ($P<0.05$). There were positive correlations between plant height, chlorophyll content, photosynthetic rate and fruit yield ($P<0.01$). In terms of the average content of fruit soluble solids, Vc and soluble protein in aeration treatments increased by 16.73%, 12.13%, and 11.59%, respectively, compared to the conventional drip irrigation. Total acid in fruit under aeration treatments decreased by 11.44% compared to the conventional drip irrigation ($P<0.05$). While the average value of fruit soluble solids, fruit total acid, Vc, and soluble protein with the high irrigation rates were increased by 16.09%, 17.60%, and 18.99% compared to the low irrigation amount, and total fruit acid in the high irrigation volume decreased by 16.38% compared to the low irrigation amount ($P<0.05$). The average value of soluble fruit solids, Vc and soluble protein with the normal N application rate increased by 12.65%, 41.81%, and 28.03%, respectively, compared to the low N application rate, total fruit acid in the normal N application rate decreased by 7.97% compared to the low N application rate ($P<0.05$). Combination of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, irrigation rates of $1\ 237 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and air void fraction of 15% was an optimal scheme for water-fertilizer-gas coupled drip irrigation for tomato growth and fruit quality promotion.

Keywords: greenhouse tomatoes; water-fertilizer-gas coupled drip irrigation; soil aeration; growth; photosynthesis; yield; fruit quality

番茄是广为栽培的果菜类蔬菜之一,温室番茄已成为设施栽培的主要形式。面对水肥不合理施用造成的番茄产量和品质下降现状,如何实现番茄优质高效栽培,是近年来广为关注的热点问题。水、肥、气耦合滴灌是一种新型的滴灌技术,具有调节作物根区水、肥、气状况,改善根系生长环境的特点^[1]。目前,国内外学者对水肥耦合滴灌条件下作物的生长发育、产量品质等方面进行了较多研究^[2-4],结果表明,与传统的灌水施肥方式相比,滴灌施肥能增加番茄产量、有效提高水分和氮肥利用效率。加气灌溉在地下滴灌的基础上,将水气混合液和微型气泡输送到作物根区土壤,调控土壤中的水气比,有效改善作物根区缺氧状况^[5-6]。温改娟等^[7]研究发现,加气灌溉对株高、茎粗的生长有益,可提升番茄生长、产量和果实品质。因地下滴灌导致根区土壤缺氧,作物根系生长、根系呼吸和土壤微生物呼吸受到限制,阻碍养分运输等,影响作物生长发育^[8-9]。Bhattarai 等^[6,10]研究表明加气灌溉下土壤氧气含量显著增大,灌水时加气灌溉处理土壤氧气含量的下降(25%)明显低于不加气灌溉(45%)。因此加气灌溉有提高灌水效率、增大土壤氧气含量等作用,能够缓解由土壤湿润造成的土壤缺氧,进而改善作物根系土壤微环境,促进作物生长和产量提高。总的来说,以往的研究初步探索了增氧灌溉在促进作物生长、提高产量、改善品质中的作用,但水、肥、气耦合条件下番茄优质高产的水、肥、气优化组合方案筛选研究还不深入。本文

针对不同施肥水平、灌水水平和掺气水平,研究水、肥、气耦合滴灌对温室番茄生长生理、产量和品质的影响,进而探索较优的水、肥、气组合方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2017年9月27日—2018年1月28日在华北水利水电大学农业高效用水实验场现代化温室($113^{\circ}47'20.15''\text{E}$, $34^{\circ}47'5.91''\text{N}$)中进行。该地属温带季风气候,多年平均气温 14.3°C ,7月份气温最高,月平均气温 27.3°C ,1月份气温最低,月平均气温 0.1°C ,无霜期 200 d,全年日照时数约 2 400 h。温室建筑总面积为 537.6 m^2 ,跨度为 9.6 m,开间为 4 m;玻璃温室内,南面、北面分别装有风机和湿帘,以调节温室内温度、湿度;期间温室内温度及空气湿度分别控制在 35°C 和 85% 以内。

1.2 试验材料

供试土壤为郑州黏土,平均土壤容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。0~40 cm 土层按照每 10 cm 土层深度取样,剖面土壤质地均匀,砂粒(0.02~2 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和黏粒($<0.002 \text{ mm}$)质量分数分别为 32.99%、34.03% 和 32.98%。土壤 pH 值为 6.50,有机质质量分数 $13.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全氮、全磷、全钾质量分数分别为 0.81、0.79 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、30.38 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,田间持水率(质量含水率)28%。供试番茄品种为“金鹏 8 号”。

1.3 试验设计

试验设置施氮量(低氮和常氮)、掺气量(非曝

气和循环曝气)和灌水量(低水量和高水量)3 因素 2 水平完全随机区组设计,共 8 个处理,每个处理 4 次重复。试验设计列于表 1。

试验区域共设 32 个小区,小区长 2 m,宽 1 m,小区面积 2 m²。小区内起垄种植番茄,垄高 10 cm,每垄定植 5 株,株距 33 cm。小区内采用地下滴灌方式进行供水,滴灌带型号为 JOHN DEERE,埋深为 15 cm,直径为 16 mm,壁厚为 0.6 mm,滴头额定流量为 1.2 L · h⁻¹,间距为 33 cm,额定工作压力为 0.10 MPa。植株距离滴头 10 cm,平行于滴灌带布置。

1.4 试验管理

番茄于 4 叶 1 心至 5 叶 1 心时移栽。移栽当天浇透底水,移植 10 d 后覆膜,株高 30~40 cm 时进行吊蔓,三穗果时打顶。番茄生育期共计 124 d,生育期划分见表 2。

试验中所施用的肥料为全水溶型肥料施乐多(含硝态氮 7.1%,铵态氮 1.1%,脲态氮 6.9%,P₂O₅

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	施氮量/(kg · hm ⁻²) Nitrogen application rate	掺气比例/% Air void fraction	灌水量/mm Irrigation rate
N ₁ CW ₁	135	0	82.37
N ₁ AW ₁	135	15	82.37
N ₁ CW ₂	135	0	123.71
N ₁ AW ₂	135	15	123.71
N ₂ CW ₁	180	0	82.37
N ₂ AW ₁	180	15	82.37
N ₂ CW ₂	180	0	123.71
N ₂ AW ₂	180	15	123.71

注:N₁、N₂分别为低氮和常氮处理,C、A 分别为非曝气和循环曝气处理,W₁、W₂分别为低水量和高水量灌溉处理,下同。

Note: N₁ and N₂ are low and normal N application treatments, respectively. C and A are the non-aerated and continuous aeration treatments, respectively. W₁ and W₂ are the low irrigation and high irrigation rate treatments. The same below.

表 3 生育期内灌水量

Table 3 Irrigation volume during crop growing season

灌溉时间(y-m-d) Irrigation time	移植后天数/d Days after transplanting	灌水量/mm Irrigation rate		灌溉时间(y-m-d) Irrigation time	移植后天数/d Days after transplanting	灌水量/mm Irrigation rate	
		W ₁	W ₂			W ₁	W ₂
2017-10-17	21	4.80	7.20	2017-12-8	73	6.90	10.35
2017-10-24	28	5.04	7.56	2017-12-15	80	5.94	8.91
2017-10-30	34	5.64	8.46	2017-12-22	87	5.67	8.50
2017-11-9	44	9.36	14.04	2017-12-28	93	5.27	7.90
2017-11-15	50	5.04	7.56	2018-01-05	101	6.93	10.40
2017-11-21	56	3.90	5.85	2018-01-13	109	6.27	9.40
2017-11-25	60	5.04	7.56	2018-01-21	117	2.50	3.90
2017-11-30	65	4.08	6.12	总灌水量 Total irrigation rate		82.38	123.71

15%,K₂O 30%,螯合态微量元素 Fe 0.1%,Mn 0.05%,Zn 0.15%,Cu 0.05%,Mo 0.05%,B 0.1%,由中国康拓肥料有限公司生产)。利用施肥器将水溶肥掺入水流,在制水罐中混匀,分别于移植后 44 d 和 65 d 等量施入田间,N₁处理施肥量为 135 kg · hm⁻²,N₂处理施肥量为 180 kg · hm⁻²;常规滴灌利用供水装置进行供水;曝气滴灌处理利用文丘里空气射流器(Mazzei air injector 684,美国 Mazzei Corp 公司)进行曝气。试验中利用储水管路、循环泵、文丘里空气射流器等设备制得掺气比率约为 15%的掺气水(曝气 20 min)^[11],通过地下滴灌系统供水。各小区分别供水,供水压力为 0.10 MPa,采用滴水计量器计量灌水量。试验中灌水下限根据距离植株径向 10 cm、纵向 20 cm 埋深处的张力计(12 型分体式张力计,中国农业科学院农田灌溉研究所)确定:土壤基质势下限控制在-30±5 kPa^[12]。灌水量根据式(1)计算^[13]:

$$W = A \cdot E_p \cdot K_p \tag{1}$$

式中,W 为各处理每次的灌水量(mm);A 为小区控制面积(2m²);E_p 为 1 个灌水周期内 Φ601 蒸发皿的蒸发量(mm);K_p 为蒸发皿系数,W₁ 处理取 0.6,W₂ 处理取 0.9^[14]。灌溉时间及灌水量参见表 3。

表 2 番茄生育期划分

Table 2 Duration of tomato growth period

生育期 Growth stage	起止时间(y-m-d) Start and end date	移栽后时期/d Duration
苗期 Seedling stage	2017-9-27—2017-10-23	1~27
开花坐果期 Blooming and setting stage	2017-10-24—2017-11-8	28~43
果实膨大期 Fruit expanding stage	2017-11-9—2017-12-16	44~81
成熟期 Maturing stage	2017-12-17—2018-1-28	82~124

1.5 测定指标与方法

1.5.1 土壤呼吸和氧气扩散速率 在番茄果实膨大期,选择 1 个完整的灌水周期监测土壤呼吸和土壤氧气扩散速率。利用氧化还原电位测量仪(上海仪电科学仪器股份有限公司,中国)测定土壤氧气扩散速率(Oxygen Diffusion Rate, ODR),探头埋设地表以下 20 cm^[13];采用土壤呼吸测量系统(ADC LCI-SD,英国 Delta-T 公司)测量土壤呼吸。测定时间为每天的 9:00 和 15:00,测量前将土壤呼吸室底座提前埋设于待测土壤中,测量稳定后(1~3 min)读数^[15]。

1.5.2 生长性状 每个处理随机选取 4 株番茄测定株高和地上部分鲜重。分别于移植后 27、39、53 d 和 66 d,利用精度为 0.01 m 的直尺测量株高。

1.5.3 叶绿素含量 利用 SPAD-502 叶绿素含量测定仪,以番茄顶部第 2 片完全展开叶为测量对象,每个处理随机选取 3 株,分别于移植后 27、32、39、53、63、77、91 d 和 109 d 测定标记番茄叶绿素含量。

1.5.4 叶片光合特性 采用光合测定仪(Li 6400XT,美国 LI-COR 公司),以番茄顶部第 2 片完全展开叶为测量对象,每个处理随机选取 3 株,分别于移植后 49、59、75、90 d 和 115 d 测定净光合速率。

1.5.5 产量和品质 生育期分批摘取番茄果实,采用精度为 0.01 g 电子天平称量果实质量,产量为每次采收果实质量之和;使用硬度计测定番茄果实硬度;使用糖度计(PAL-1,日本 ATAGO 公司)测定番茄可溶性固形物含量;使用酸碱滴定指示剂法测定果实总酸含量^[16];采用 2,6-二氯酚酚滴定法果实测定 Vc 含量^[17];利用考马斯亮蓝-G250 染色法测定果肉可溶性蛋白质含量^[17]。

1.6 统计分析

采用 Excel 2013 进行数据处理和绘图,通过

SPSS 22.0 统计软件进行数据分析,当 $P<0.05$ 时视为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 水、肥、气耦合滴灌对土壤呼吸和氧气扩散速率的影响

图 1 为 1 个灌水周期内土壤呼吸(R)和土壤氧气扩散速率(ODR)的变化动态,由于施氮量对土壤呼吸和土壤氧气扩散速率无显著影响,故选择常氮施肥水平进行说明。在番茄果实膨大期,土壤呼吸的高峰值出现在灌水后第 2 天下午。在整个灌溉过程中, N_2AW_2 最大, N_2CW_1 最小。循环曝气处理对土壤呼吸有显著提升效果,在灌水后第 2 天下午最为显著, N_2AW_1 较 N_2CW_1 , N_2AW_2 较 N_2CW_2 分别提高 37.01%和 36.49% ($P<0.05$)。不同处理土壤 ODR 先下降后上升,之后逐渐趋于平稳。其中, N_2AW_1 和 N_2AW_2 较大, N_2CW_1 和 N_2CW_2 较小。灌水后第 2 天,各处理 ODR 开始逐渐回升, N_2AW_1 和 N_2AW_2 较 N_2CW_1 和 N_2CW_2 平均增大 14.93%和 17.98% ($P<0.05$)。说明循环曝气处理更有利于改善土壤微环境。本试验中,灌水量对土壤呼吸和土壤氧气扩散速率均无显著影响($P>0.05$)。

2.2 水、肥、气耦合滴灌对番茄生长生理指标和生物量的影响

2.2.1 对番茄株高的影响 不同处理番茄株高动态变化见图 2。试验中各处理的株高随着移栽天数的增加而增加,以移植后第 66 天为代表:与非曝气处理相比,曝气处理番茄株高平均增加 9.81% ($P<0.05$);与低水量处理相比,高水量处理番茄株高平均增加 18.14% ($P<0.05$);与低氮处理相比,常氮处理番茄株高平均增加 6.58% ($P<0.05$)。说明循环曝气、高水量和常氮处理可有效促进番茄的生长。

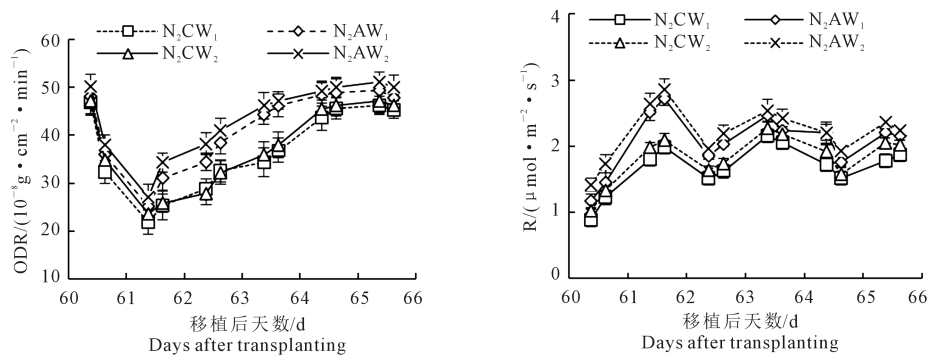


图 1 不同处理下土壤氧气扩散速率(ODR)和土壤呼吸(R)的变化动态
Fig.1 Soil oxygen diffusion rate (ODR) and soil respiration(R) dynamics under different treatments

2.2.2 对番茄叶片叶绿素含量的影响 由图 3 分析可知,生育期内各处理番茄叶绿素含量呈现先上升后下降,最后趋于平稳的变化趋势。与非曝气处理相比,曝气处理番茄叶绿素含量平均增加 8.63% ($P<0.05$);与低水量处理相比,高水量处理番茄叶绿素含量平均增加 11.44% ($P<0.05$);与低氮处理相比,常氮处理番茄叶绿素含量平均增加 8.20% ($P<0.05$),循环曝气、高水量和常氮处理可有效提高番茄叶绿素含量。

2.2.3 对番茄净光合速率的影响 不同处理番茄叶片净光合速率见表 4。与低氮处理相比,处理 N_2CW_1 在 59、75、90 d 和 115 d 平均增幅 17.23% ($P<0.05$),处理 N_2AW_1 在 115 d 平均增幅 15.28% ($P<0.05$),处理 N_2CW_2 在 75 d 和 115 d 平均增幅 17.23% ($P<0.05$),处理 N_2AW_2 在 49、75 d 和 115 d 平均增幅 18.68% ($P<0.05$)。说明循环曝气、高灌水量和常氮处理可有效提高番茄净光合速率。

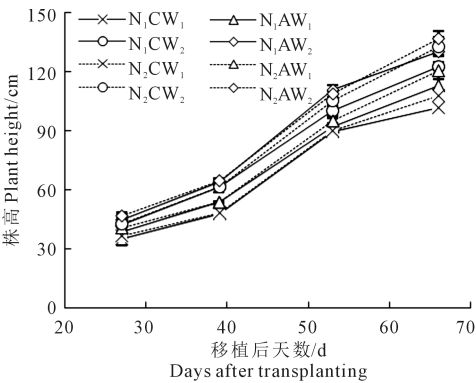


图 2 不同处理番茄株高动态变化

Fig.2 Plant height dynamic of greenhouse tomato under different treatments

2.2.4 对番茄产量及地上部鲜重的影响 由表 5 分析可知,单因素作用下,从产量来看,与非曝气处理相比,曝气处理提高 22.91% ($P<0.05$);高水量处理较低水量处理平均提高 41.19% ($P<0.05$);常氮处理较低氮处理平均提高 40.87% ($P<0.05$)。从地上部鲜重变化看,曝气处理较非曝气处理平均提高 14.93% ($P<0.05$),高水量处理较低水量处理平均提高 27.10% ($P<0.05$),常氮处理较低氮处理平均提高 24.89% ($P<0.05$)。两因素交互作用中,施氮量与掺气处理、施氮量与灌水量对番茄产量、地上部鲜重有极显著影响 ($P<0.01$),掺气处理与灌水量对地上部鲜重有极显著影响 ($P<0.01$)。灌水量、掺气处理和施氮量互作对番茄产量及地上部鲜重均无显著影响 ($P>0.05$)。说明循环曝气、高水量和常氮处理可有效提高番茄产量和地上部鲜重。

2.3 土壤呼吸、氧气扩散速率、番茄生长生理指标及产量之间的相关关系

对土壤呼吸、氧气扩散速率、株高、叶绿素含量、

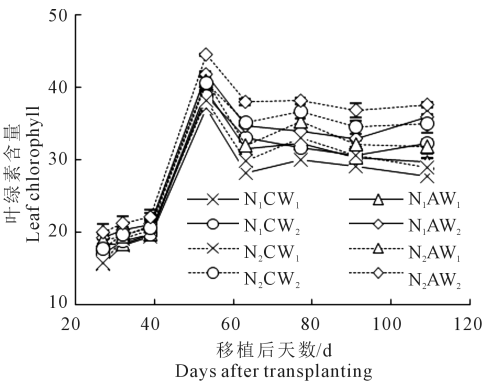


图 3 不同处理番茄叶绿素含量的动态变化

Fig.3 Chlorophyll content dynamics of tomato under different treatments

表 4 不同处理番茄的净光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 4 Net photosynthetic rate of greenhouse tomato under different treatments

处理 Treatment	移植后天数 Days after transplanting/d				
	49	59	75	90	115
N_1CW_1	19.83±2.65b	16.95±1.56c	16.91±0.69e	8.99±0.16d	6.23±0.20g
N_1AW_1	20.27±1.45b	19.12±0.51b	19.58±0.35d	11.30±0.36b	8.05±0.19e
N_1CW_2	20.07±1.71b	20.01±1.73b	20.68±1.12cd	11.62±0.44b	9.14±0.20d
N_1AW_2	20.72±0.57b	21.91±0.98a	21.88±0.29bc	13.45±0.68a	11.09±0.47c
N_2CW_1	19.91±2.30b	20.06±1.04ab	19.94±1.57d	10.05±1.57c	7.53±1.57f
N_2AW_1	21.06±0.14ab	20.34±0.55ab	20.31±0.59d	11.98±0.59b	9.28±0.59d
N_2CW_2	20.49±0.94b	19.64±1.05b	22.24±0.84b	12.05±0.84b	11.60±0.84b
N_2AW_2	23.07±0.99a	21.75±0.54a	25.23±0.58a	14.11±0.58a	14.35±0.58a

注:表中数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Data is expressed as average value ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatment at $P<0.05$. The same below.

净光合速率及产量进行相关性分析,结果见表 6。土壤呼吸与氧气扩散速率呈极显著正相关($P<0.01$);氧气扩散速率和土壤呼吸与产量呈显著正相关($P<0.05$);株高与叶绿素含量、净光合速率和产量呈极显著正相关($P<0.01$),叶绿素含量与净光合速率和产量呈极显著正相关($P<0.01$),净光合速率与产量呈极显著正相关($P<0.01$)。说明土壤根际环境的改善有利于番茄生长,进而提高番茄产量。

2.4 水、肥、气耦合滴灌对番茄果实品质的影响

由表 7 分析可知,循环曝气、高水量和常氮处理可有效改善番茄的果实品质。单因素作用下,与非曝气处理相比,曝气处理番茄果实可溶性固形物平均增加 16.73% ($P<0.05$);与低水量相比,高水量处

表 5 不同处理的番茄生物量

Table 5 Biomass of greenhouse tomato under different treatments

处理 Treatment	产量/(t·hm ⁻²) Yield	地上部鲜重/(kg·hm ⁻²) Fresh weight aboveground
N ₁ CW ₁	16.29±1.01f	19622.00±501.29g
N ₁ AW ₁	19.51±0.70e	21313.88±601.50ef
N ₁ CW ₂	22.91±0.59d	21988.94±775.33de
N ₁ AW ₂	27.34±0.52c	24532.00±1062.12c
N ₂ CW ₁	22.03±0.27d	20389.31±1267.11fg
N ₂ AW ₁	28.29±0.41c	23420.69±1459.02cd
N ₂ CW ₂	31.81±1.18b	27498.13±1130.48b
N ₂ AW ₂	39.47±1.04a	34281.50±774.21a
显著性检验 F 值 F value of significance test		
施氮量 N treatment (N)	781.262**	165.350**
掺气处理 Aeration treatment (A)	287.612**	99.267**
灌水量 Irrigation treatment (W)	775.538**	279.015**
N×A	24.265**	15.657**
N×W	26.299**	77.132**
A×W	4.199	10.656**
N×A×W	0.023	4.232

注: * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$),下同。
Note: * indicates significant difference at $P<0.05$; ** indicates extremely significant different at $P<0.01$. The same below.

表 6 土壤呼吸 (R)、氧气扩散速率 (ODR)、番茄生长生理指标及产量之间的相关关系

Table 6 Correlations among soil respiration (R), oxygen diffusion rate (ODR), tomato growth physiology and yield

指标 Index	ODR	R	株高 Plant height	叶绿素含量 Chlorophyll content	净光合速率 <i>P_n</i>	产量 Yield
ODR	1	0.868**	0.478	0.549	0.465	0.590*
R		1	0.440	0.505	0.426	0.625*
株高 Plant height			1	0.964**	0.846**	0.921**
叶绿素含量 Chlorophyll content				1	0.860**	0.924**
净光合速率 <i>P_n</i>					1	0.903**
产量 Yield						1

理番茄果实可溶性固形物平均增加 16.11% ($P<0.05$);常氮处理番茄果实可溶性固形物较低氮处理平均增加 12.65% ($P<0.05$)。与非曝气处理相比,曝气处理果实总酸含量平均降低 11.44% ($P<0.05$);与低水量处理相比,高水量处理果实总酸含量平均降低 16.38% ($P<0.05$);常氮处理果实总酸含量较低氮处理平均降低 7.97% ($P<0.05$)。与非曝气处理相比,曝气处理果实 Vc 含量平均增加 12.13% ($P<0.05$);与低水量处理相比,高水量处理果实 Vc 含量平均增加 17.60% ($P<0.05$);常氮处理果实 Vc 含量较低氮处理平均增加 41.81% ($P<0.05$)。与非曝气处理相比,曝气处理果实可溶性蛋白质含量平均增加 11.59% ($P<0.05$);与低水量处理相比,高水量处理果实可溶性蛋白质含量平均增加 18.99% ($P<0.05$);常氮处理果实可溶性蛋白质含量较低氮处理平均增加 28.03% ($P<0.05$)。

两因素交互作用中,施氮量和掺气处理对 Vc 含量、可溶性蛋白质含量有极显著影响 ($P<0.01$);施氮量和灌水量对可溶性固形物有显著影响 ($P<0.05$)、对 Vc 含量和可溶性蛋白质含量有极显著影响 ($P<0.01$);掺气处理和灌水量对可溶性固形物含量有极显著影响 ($P<0.01$),对总酸含量和 Vc 含量有显著影响 ($P<0.05$)。灌水量、掺气处理和施氮量 3 因素互作对番茄果实品质无显著影响 ($P>0.05$)。

3 讨 论

3.1 水、肥、气耦合滴灌对温室番茄生长生理指标的影响

土壤通气性是表征土壤透气性和土壤氧气含量的综合指标,土壤气体的组成、吸附、产生及其对植物的作用等各个方面都与之相关^[18]。土壤通气状况直接影响根系呼吸,作物根系缺氧易造成乙醇、脱落酸等植物激素的增加,这将导致叶片净光合速率下降,影响 ATP 的产生,进而影响作物生长^[19]。

表 7 不同处理的番茄果实品质

Table 7 Fruit quality of tomato under different treatments

处理 Treatment	可溶性固形物/% TSS	总酸含量/% Total acid content	Vc 含量/(mg · 100g ⁻¹) Vc content	可溶性蛋白质含量/(g · kg ⁻¹) Soluble protein content
N ₁ CW ₁	4.07±0.21d	0.75±0.014a	6.55±0.111g	16.65±0.07f
N ₁ AW ₁	4.37±0.12cd	0.66±0.006c	7.83±0.140f	17.32±0.23f
N ₁ CW ₂	4.30±0.17d	0.63±0.005d	8.48±0.074e	18.96±0.69e
N ₁ AW ₂	4.97±0.25b	0.58±0.009e	9.91±0.147d	20.25±0.73d
N ₂ CW ₁	4.23±0.21d	0.71±0.028b	10.82±0.253c	19.48±1.39de
N ₂ AW ₁	4.67±0.15bc	0.62±0.011d	11.25±0.078b	22.79±0.19c
N ₂ CW ₂	4.67±0.25c	0.58±0.021e	11.37±0.295b	24.51±0.75b
N ₂ AW ₂	5.80±0.17a	0.50±0.015f	12.29±0.178a	27.21±0.64a
显著性检验 <i>F</i> 值 <i>F</i> value of significance test				
施氮量 N treatment(N)	26.882 **	65.455 **	2033.742 **	321.953 **
掺气处理 Aeration treatment(A)	62.108 **	153.891 **	198.751 **	47.133 **
灌水量 Irrigation treatment(W)	55.742 **	326.473 **	379.195 **	160.574 **
N×A	3.484	0.655	22.889 **	12.202 **
N×W	5.204 *	2.618	70.535 **	13.144 **
A×W	11.011 **	7.273 *	5.103 *	0.000
N×A×W	1.075	1.818	1.479	1.109

增氧灌溉水气两相流动中微气泡易附着于土壤孔隙,可向水中持续供氧,以维持土壤中良好的氧气环境^[11]。文丘里空气射流器循环曝气将微气泡和水混合起来运送到作物根区,利用双氧水灌溉,可向根际土壤中缓慢释放氧气^[20],改善根际土壤缺氧环境。温改娟等^[7]研究表明,加气灌溉下番茄的株高增加了 36.54%。朱艳等^[21]研究表明,加气灌溉下番茄茎粗、叶面积等显著增大。李元等^[22]研究也表明,加气灌溉对叶绿素含量、株高、干物质积累均有显著影响。本试验中,曝气处理可提高番茄株高和叶绿素含量,促进番茄生长。这些结果表明,常规灌溉易造成土壤通气性不良,体现在根系呼吸强度下降,作物根际土壤发生低氧胁迫,导致根系生长环境恶化,不利于地上部的生长。因此,通过提高灌溉水的氧气浓度,将氧气或含氧物质输送到根区,可改善根系环境,促进根系对水分和养分的吸收利用^[23],进而对番茄生长产生积极的影响。

3.2 水、肥、气耦合滴灌对温室番茄产量及品质的影响

作物产量与本身遗传因子和外部环境有关,土壤呼吸、土壤氧气含量、土壤水分和土壤温度等是影响作物产量的主要环境因素,它们之间相互影响,其中一个因素的变化将会影响整体土壤环境的改变。土壤呼吸是大气与土壤之间进行气体交换的主要方式,主要来自作物根系的自养呼吸作用和土壤微生物的异养呼吸作用,土壤水分、温度及土

壤通气性均会对土壤呼吸产生重要影响^[24]。土壤氧气含量对植株的作用至关重要,在灌溉过程中,作物根系常处于缺氧的不利生长环境中,缺氧将导致作物蒸腾速率减慢,养分吸收受阻,植株生长受到抑制,作物的产量和品质必然会受到影响。增氧灌溉改善根区氧气环境,将含氧物质输送到作物根区,增强根系的自养呼吸作用^[25],还增强了好氧微生物的繁殖以及土壤酶活性^[26],改善根际土壤环境,促进根系的干物质积累,提高了作物产量。本试验中,曝气滴灌在改善土壤根系环境的同时,促进了作物生长,进而提高了作物产量。灌水水平和施肥水平的提高对番茄产量和地上部鲜重均产生显著的积极影响。在果实品质方面,Vc 含量、总酸含量等是反映番茄口感的重要指标。前人研究表明,加气灌溉下番茄果实中番茄红素、Vc 等含量显著增大,改善了番茄的果实品质和风味,但随灌水水平的增大,一定程度上降低了果实品质^[21]。本试验中,循环曝气、提高灌水量、增加施氮量均使 Vc 含量、可溶性固形物和可溶性蛋白质含量有显著提高,而总酸含量有所降低,可有效改善番茄的果实品质。

4 结 论

1)循环曝气、高水量和常氮处理可有效促进番茄生长,显著提高叶绿素含量和净光合速率,为番茄增产奠定了生理基础。

2) 灌水量、施氮量和掺气量的改变对番茄产量及地上部鲜重产生不同程度影响。其中,曝气处理较非曝气处理平均提高 22.91% 和 14.93%,高水量处理较低水量处理平均提高 41.19% 和 27.10%,常氮处理较低氮处理平均提高 40.87% 和 24.89%,差异均达显著水平。

3) 灌水量、施氮量的改变和掺气处理可有效改善番茄果实品质。各处理可溶性固形物、Vc 含量、可溶性蛋白质含量较相应对照显著增加,总酸含量显著降低。

综合比较番茄生长生理、产量和品质指标,本试验中,常氮高水量循环曝气处理是促进温室番茄生长和品质提升的水、肥、气适宜组合方案,相应的施氮量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,灌水量为 $1\,237\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,掺气比率为 15%。

参 考 文 献:

[1] 赵丰云,杨湘,董明明,等. 加气灌溉改善干旱区葡萄根际土壤化学特性及细菌群落结构[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22):119-126.

[2] Hebbar S S, Ramachandrappa B K, Nanjappa H V, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1):117-127.

[3] Mahajan G, Singh K. Response of Greenhouse tomato to irrigation and fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1-2):202-206.

[4] 虞娜,张玉龙,黄毅,等. 温室滴灌施肥条件下水肥耦合对番茄产量影响的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(3):179-183.

[5] Bhattarai S P, Su N H, Midmore D J. Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88:313-377.

[6] 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.

[7] 温改娟,蔡焕杰,陈新明,等. 加气灌溉对温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3):83-87.

[8] Ben-Noah I, Fiedman S P. Aeration of clayey soils by injecting air through subsurface drippers: lysimetric and field experiments[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176:222-233.

[9] Li Y, Niu W Q, Wang J W, et al. Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance

when cultivating greenhouse tomato[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5):1208-1221.

[10] Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergast L. 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(5):439-450.

[11] 雷宏军,臧明,张振华,等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22):63-69.

[12] 万书勤,闫振坤,康跃虎,等. 土壤基质势调控对温室滴灌番茄土壤水分分布和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5):1-11.

[13] 雷宏军,杨宏光,刘欢,等. 水、肥、气耦合滴灌番茄地土壤 N_2O 排放特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):95-104.

[14] 龚雪文,刘浩,孙景生,等. 日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):166-175.

[15] 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):117-126.

[16] 唐晓伟,刘明池,郝静,等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4):970-977.

[17] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(2):314-323.

[18] Smith K A. Soil aeration[J]. Soil Science, 1977, 123(5):284-291.

[19] Fukao T, Bailey-Serres J. Plant responses to hypoxia-is survival a balancing act? [J]. Trends in plant science, 2004, 9(9):449-456.

[20] 刘朵朵,姚帮松,张文萍,等. 根区供氧对滞水油菜生长特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3):128-130.

[21] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8):199-211.

[22] 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.

[23] Zhu J W, Liang J, Xu Z H, et al. Root aeration improves growth and nitrogen accumulation in rice seedlings under low nitrogen[J]. AoB Plants, 2015, 7(3):225-228.

[24] 杨士红,王乙江,徐俊增,等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):140-146.

[25] Bhattarai S P, Huber S, Midmore D J. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils[J]. Annals of Applied Biology, 2015, 144(3):285-298.

[26] Li Y, Niu W Q, Wang J W, et al. Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance when cultivating greenhouse tomato[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5):1208-1221.