

循环曝气地下滴灌下温室番茄生长特性与产量研究

张倩¹ 曾健¹ 张振华² 雷宏军³ 张鹏¹ 柳栋¹

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018; 2. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025;

3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450011)

摘要: 为探讨循环曝气地下滴灌不同肥气耦合处理对作物生长、光合特性及产量的影响规律,以番茄(京鲁 6335)为研究对象,利用循环曝气装置实现水肥气一体化灌溉,设置 4 个曝气量(高曝气 O1,中曝气 O2,低曝气 O3,不曝气 S,掺气比例分别为 16.25%、14.58%、11.79% 和 0),3 个施肥量(高肥 F1,中肥 F2,低肥 F3),采用双因素随机区组试验设计,共 12 个处理,研究不同肥气耦合处理对温室番茄生长特性、叶绿素含量、光合作用、干物质积累及产量的影响。结果表明:对温室番茄进行循环曝气地下滴灌可显著提高植株株高和茎粗、叶片叶绿素含量和气孔导度,增强光合作用,提高干物质积累量和产量。随曝气量的升高,株高和茎粗总体上呈现增大趋势,曝气灌溉较不曝气灌溉处理株高最大增幅为 22.57%,茎粗最大增幅为 7.25%。同一施肥水平下高曝气灌溉处理较不曝气灌溉处理番茄植株净光合速率、气孔导度、蒸腾速率平均分别增大 52.46%、60.64% 和 36.88%,叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量平均升高 33.17% 和 48.71%。中肥水平下高曝气灌溉处理干物质积累总量和果实干物质积累量较不曝气灌溉处理平均提高 31.66% 和 36.95%,单株产量和单果质量较不曝气灌溉处理平均提高 12.80% 和 19.51%,同一曝气水平下,中肥处理番茄株高、茎粗、净光合速率、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量和植株干物质质量较高肥和低肥处理均有显著增大。循环曝气地下滴灌肥气耦合下番茄单株产量与植株株高、茎粗和净光合速率均呈极显著正相关($P<0.01$),高曝气灌溉中肥处理番茄产量与植株株高、茎粗和净光合速率相关系数高于其他试验处理。因此,考虑各处理对番茄植株生长特性、光合特性、干物质积累量和产量的综合影响,高曝气灌溉中肥水平是本试验条件下温室番茄较优的灌溉施肥模式。

关键词: 温室番茄; 循环曝气地下滴灌; 生长特性; 光合特性; 干物质积累量; 产量

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)02-0365-13

OSID:



Impacts of Cycle Aerated Subsurface Drip Irrigation on Growth Characteristics and Yield of Greenhouse Tomato

ZHANG Qian¹ ZENG Jian¹ ZHANG Zhenhua² LEI Hongjun³ ZHANG Peng¹ LIU Dong¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

3. School of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: To investigate the effects of different fertilizer-air coupling treatments on crop growth characteristics, photosynthetic characteristics and yield under cycle aerated subsurface drip irrigation, tomato (Jinglu 6335) was taken as the research object, and the recycling aeration device was used to supply water, fertilizer and gas. Four aeration quantities (O1 was high aeration, O2 was medium aeration, O3 was low aeration, S was no aeration, aeration ratio was 16.25%, 14.58%, 11.79% and 0, respectively), three fertilizer quantities (F1 was high fertilizer, F2 was medium fertilizer, F3 was low fertilizer) were set, and a two-factor randomized block experimental design was adopted, with a total of 12 treatments. The effects of different fertilizer-air couplings on plant growth characteristics, chlorophyll content, photosynthesis, plant dry matter accumulation and yield of greenhouse tomato were studied. The results showed that cycle aerated subsurface drip irrigation could significantly increase plant height, stem

收稿日期: 2021-01-03 修回日期: 2021-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407703)、国家自然科学基金项目(51909151、52079052)和山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY010710)

作者简介: 张倩(1983—),女,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangqian864@163.com

diameter, leaf chlorophyll content and stomatal conductance, enhance photosynthesis, and increase dry matter accumulation and yield of greenhouse tomato. The plant height and stem diameter were increased with the increase of aeration. The maximum increase of plant height and stem diameter was 22.57% and 7.25% respectively in aerated irrigation treatment compared with non-aerated irrigation treatment. At the same fertilization levels, compared with non-aerated irrigation, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of high aeration irrigation treatment were increased by 52.46%, 60.64% and 36.88% respectively, the contents of chlorophyll a and chlorophyll b were increased by 33.17% and 48.71%, respectively. The plant dry matter accumulation and fruit dry matter accumulation under high aeration irrigation at medium fertilizer level were increased by 31.66% and 36.95% on average, and the yield of single plant and the weight of single fruit were increased by 12.80% and 19.51% compared with that of non-aerated irrigation. At the same aeration level, plant height, stem diameter, net photosynthetic rate, chlorophyll a, chlorophyll b and plant dry matter accumulation of tomatoes under medium fertilizer treatments were significantly increased compared with those under high and low fertilizer treatments. The yield of tomato single plant was significantly positively correlated with plant height, stem diameter and net photosynthetic rate ($P < 0.01$), and the correlation coefficient between yield and plant height, stem diameter and net photosynthetic rate of tomato under medium fertilizer treatment in high aeration irrigation was higher than that of other treatments. Therefore, considering the effects of various treatments on the growth characteristics, photosynthetic characteristics, plant dry matter accumulation and yield, the medium fertilization level in high aeration irrigation was the preferable irrigation and fertilization mode for greenhouse tomato.

Key words: greenhouse tomato; cycle aerated subsurface drip irrigation; growth characteristics; photosynthetic characteristics; dry matter accumulation; yield

0 引言

作物在生长发育过程吸收水分和养分,需要根系供给氧气,土壤中氧气含量可直接影响作物根系呼吸和养分的吸收等,进而影响作物生长发育^[1-2]。现代农业种植中,地下滴灌是公认的节水灌溉技术^[3]。但是由于灌水后土壤充满水,气体被迫排出,以及使用化肥、机械压实等因素,造成土壤板结,土壤中氧气含量不足,从而抑制作物根系呼吸,制约作物生长发育,造成作物减产和品质降低^[4-5]。PENDERGAST等^[6]研究发现,地下滴灌滴头附近区域的氧气扩散率最低,长时间地下滴灌会导致滴头附近土壤缺氧;MACHADO等^[7]研究发现,在地下滴灌条件下,作物根系通常因为吸收水分而分布在滴灌带滴头位置,因此作物根系经常处于低氧环境中;PAYERO等^[8]试验表明土壤缺氧会导致作物产量降低;TAKESHI等^[9]研究表明,根区土壤含氧量不足会限制根细胞能量供应,降低根系活力,影响根系对水分和养分的吸收,导致作物干物质积累不足,从而对作物植株生长产生不利影响。

曝气滴灌是利用文丘里加气设备将空气吸入到地下滴灌管道中进而将灌溉水和空气输送到作物根区土壤的技术^[10],已有研究成果表明,曝气滴灌可以提高作物产量和水分利用率,促进作物生长,提高作物产量^[11-16]。曝气处理可显著提高果实的水分利用效率、干物质量、产量和瞬时叶片蒸腾速

率^[16-20]。

以往关于加气灌溉研究多集中于单因素处理或水气耦合、水肥耦合、滴管带埋深等复合多因素,主要关注加气灌溉对作物水分利用效率、产量及品质的提升^[21-24]。有关肥气耦合的研究较少涉及,循环曝气地下滴灌条件下不同曝气水平和施肥水平复合因素下植株光合作用的研究较少。因此,本研究以对土壤通气性比较敏感的番茄为研究对象,设置不同的曝气量及施肥量,研究曝气量和施肥量不同肥气耦合作用对番茄生长特性、光合特性、叶绿素含量及产量的影响,探求最佳的灌溉施肥模式,以期对肥气耦合灌溉下番茄增产提供相关理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验在山东农业大学日光温室进行,日光温室高5.5 m,内宽13 m,东西长52 m,有效种植面积为450 m²。试验区属于温带大陆性半湿润季风区,年均日照时数2 627.1 h。土壤类型为棕壤土,土壤碱解氮质量比136.5 mg/kg,速效磷质量比51.72 mg/kg,速效钾质量比168.07 mg/kg,pH值为6.5,电导率(EC)为0.62 mS/cm。

供试作物番茄品种为京鲁6335,属中晚熟品种。日光温室内垄长10 m,宽0.8 m,临近两垄之间用埋深100 cm的塑料膜隔开,防止侧渗,一垄为一

个试验小区。滴灌管管径为 16 mm,滴头设计流量为 2 L/h,滴头间距为 33 cm,最大工作压力为 0.2 MPa。按照滴头间距布置植株,水平距定植点约 10 cm,埋深 20 cm,每个小区供水管路单独控制,并配有精密的计量水表。所有小区施肥、灌溉、打药等田间管理措施均一致。

1.2 试验设计

试验设计两种灌水方式,分别为循环曝气地下滴灌(O)和地下滴灌(S,未进行曝气处理的灌溉,作为对照),3个曝气水平(O1、O2、O3分别表示高、中、低曝气量(掺气比例分别为16.25%、14.58%、11.79%))和3个施肥水平(F1、F2、F3分别表示高施肥量(N、P₂O₅、K₂O施加量分别为240、120、150 kg/hm²)、中施肥量(N、P₂O₅、K₂O施加量分别为180、90、112.5 kg/hm²)、低施肥量(N、P₂O₅、K₂O施加量分别为120、60、75 kg/hm²))。

共计12个试验处理(表1),试验小区随机排列设计,每个处理3次重复,共36个小区。采用单垄双行的种植方式,垄长10 m,垄宽0.8 m。有研究表明滴灌管理埋深25 cm为温室番茄种植的较优埋深^[20,25],本试验每垄铺设的滴灌带埋深设置为25 cm,滴灌带滴头间距33 cm,每垄种30株作物,每垄面积为8 m²(10 m×0.8 m)。为防止水分侧渗,垄与垄之间用塑料膜隔开,并设置保护行,以防处理之间相互影响。2019年9月22日定植,为保证成活率,定植当天浇透底水,所有小区的田间管理措施均一致,留到五穗果后打顶,全生育期约为120 d。

表1 试验设计方案
Tab.1 Design scheme of experiment

处理	灌水方式	施肥水平	处理	灌水方式	施肥水平
O1F1	高曝气量	高	O3F1	低曝气量	高
O1F2	高曝气量	中	O3F2	低曝气量	中
O1F3	高曝气量	低	O3F3	低曝气量	低
O2F1	中曝气量	高	SF1	不曝气	高
O2F2	中曝气量	中	SF2	不曝气	中
O2F3	中曝气量	低	SF3	不曝气	低

灌水量由安置在温室内的E601型蒸发皿的蒸发量确定,以前一天08:00经24 h蒸发后的蒸发量为依据,当累积蒸发量达到20 mm左右时进行灌水,其计算公式为

$$I = AK_{cp} E_p$$

式中 I——滴头每次的灌水量, mL

A——2个支管控制的小区面积,本试验为8 m²

E_p——2次灌水间隔温室内蒸发皿累积蒸发量,取20 mm

K_{cp}——蒸发皿系数,取1

曝气装置采用循环曝气装置,该装置可以实现作物的水肥气一体化灌溉。试验采用的滴灌管最大工作压力为0.2 MPa,有研究表明,随着工作压力的增大,曝气水流的掺气比例提高,曝气量可通过设置压力控制器工作压力来控制^[26]。本试验设置0.15、0.1、0.05 MPa共3个压力水平调节高、中、低3个曝气水平,灌溉水源取自地下水,地下井水温度比较稳定,保持在18℃,该水温下,高曝气量(O1)、中曝气量(O2)、低曝气量(O3)掺气比例分别为16.25%、14.58%、11.79%。在灌水进入地下滴灌系统之前进行循环曝气处理,使水气同步混合后,通过地下滴灌系统将水气混合物输送到各个作物根区。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定

温室番茄株高和茎粗缓苗后20 d进行测量,每隔10 d测定一次,株高采用卷尺测量从植株底端至植株最高生长点的垂直距离,茎粗采用游标卡尺量取番茄第2、3片叶间茎干直径,每个小区随机选取6株测定,并做标记。

1.3.2 光合指标测定

每个小区选取3株番茄植株,每株选取3片叶片,用CIRAS-3型光合测定系统随机选取充分受光、叶位一致的连体健康叶片测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、瞬时水分利用效率(WUE)和气孔限制值(L_s)等气体交换参数。测定日期为定植后60 d(开花坐果期)和108 d(果实膨大期),测定时间为09:00—11:00。

1.3.3 叶绿素含量测定

定植后60 d(开花坐果期)和108 d(果实膨大期),测定番茄叶片叶绿素a含量、叶绿素b含量。叶绿素含量的测定方法为浸提液(45%乙醇、45%丙酮和10%蒸馏水)提取色素,用分光光度计比色法分别于663、645 nm处测定吸光度,计算其含量^[27]。叶绿素含量测试选择充分受光、叶位一致的健康叶片,每小区选3株进行测量,每株选取3片叶片。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2010进行数据整理,SPSS 22.0统计软件进行数据分析,Origin Pro 9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 肥气耦合处理对温室番茄生长特性的影响

图1为曝气灌溉处理温室番茄全生育期内株高

的变化曲线。由图 1 可知,同一施肥水平曝气灌溉处理的番茄株高均大于不曝气灌溉处理,且均是高曝气灌溉处理番茄株高最高,中曝气灌溉处理其次,低曝气处理株高最低,因此同一施肥水平下,番茄株高随曝气灌溉曝气量的增大呈增高趋势。纵观整个

生育期,曝气灌溉处理对番茄生育前期株高的影响较小,定植 50 d 之前,曝气灌溉处理对番茄株高的影响不显著($P>0.05$),定植 50 d 后各处理株高差异开始逐渐显著,到打顶前各处理株高达到最高,差异达极显著($P<0.01$)。

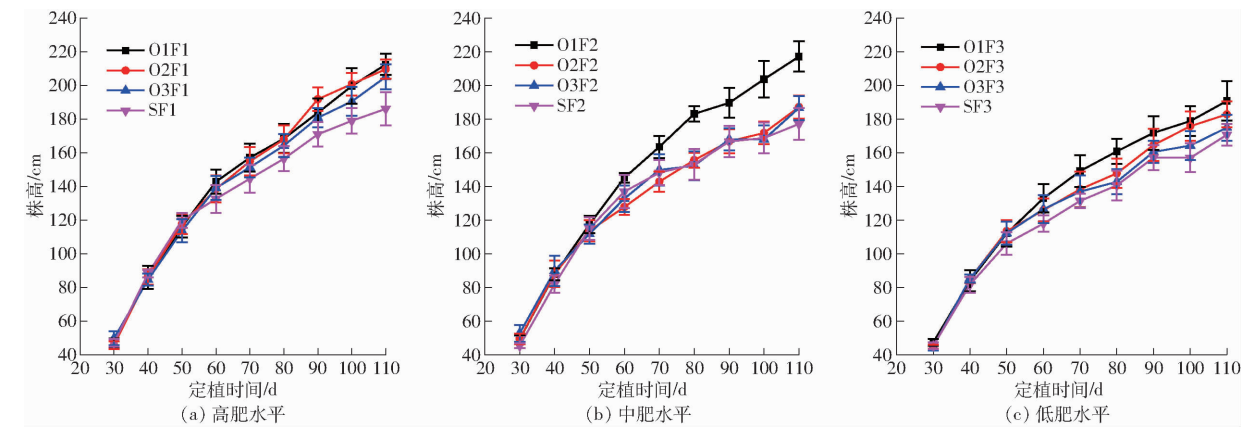


图 1 曝气灌溉处理温室番茄株高的变化曲线
Fig. 1 Variation curves of greenhouse tomato plant height under aerated irrigation treatment

由表 2 可知,番茄定植后 30 ~ 50 d 期间,曝气灌溉处理和不曝气灌溉处理番茄株高的日增长量差异不显著,其原因是此时番茄处于前期生育阶段,对土壤氧气的需求较小,因此,曝气灌溉在番茄生育前期对株高的影响不显著。番茄定植 50 ~ 70 d、70 ~ 90 d 期间,曝气灌溉处理番茄株高日增长量均较不曝气灌溉处理差异显著,高曝气灌溉处理株高日增长量最高,株高日增长量随曝气灌溉曝气量的升高呈增高趋势;定植 90 ~ 110 d 期间,番茄株高的日增长量明显放缓,所有试验处理的日增长量差异不显著,说明曝气灌溉处理在番茄生育后期对株高的影响不显著,曝气灌溉处理在番茄生育中期对株高增长的影响显著。

化规律,从图中可看出,各试验处理的番茄株高均随生育期的推进呈逐渐增大趋势。高曝气灌溉水平,中肥处理番茄株高最高,高肥处理其次,低肥处理最低;中曝气灌溉和低曝气灌溉水平下,高肥处理番茄株高最高,中肥处理其次,低肥处理株高最低,说明高曝气灌溉水平,中肥处理促进番茄植株株高生长的效果最显著,中、低曝气灌溉水平,高肥处理促进番茄植株株高生长的效果最显著。定植 30 ~ 50 d 期间,同一曝气水平不同施肥处理番茄株高日增长量差异不显著($P>0.05$),定植 50 d 后番茄株高的差异逐渐显著,定植 110 d 各试验处理株高达到最大值,差异极显著($P<0.01$),定植 90 ~ 110 d 期间,各个曝气水平番茄株高增长速度均放缓,施肥水平在番茄的生育前期和生育后期对株高的日增长量影响不显著($P>0.05$)。

表 2 株高分段日均增长量				
Tab. 2 Per-day growth of height of tomato cm				
处理	定植时间/d			
	30 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 90	90 ~ 110
O1F1	3.46	2.05	1.73	1.03
O1F2	3.41	2.30	1.64	1.05
O1F3	3.23	1.65	1.33	0.95
O2F1	3.59	1.97	1.64	0.99
O2F2	3.21	1.46	1.20	1.02
O2F3	3.43	1.24	1.32	0.91
O3F1	3.19	1.88	1.48	1.22
O3F2	3.15	1.50	1.11	0.93
O3F3	3.37	1.23	1.08	0.83
SF1	3.34	1.53	1.12	0.96
SF2	3.38	1.40	1.03	0.73
SF3	3.22	1.21	1.05	0.78

图 2 为施肥处理温室番茄全生育期内株高的变

图 3 为曝气灌溉处理温室番茄全生育期内茎粗的变化曲线,由图可知,同一施肥水平曝气灌溉处理番茄茎粗均大于不曝气灌溉处理。高肥水平,中曝气灌溉处理番茄茎粗最大,其次是高曝气灌溉处理,低曝气灌溉处理番茄茎粗最小;中、低肥水平,高曝气灌溉处理茎粗最大,中曝气灌溉处理其次,低曝气灌溉处理最小,因此中、低肥水平,茎粗随曝气灌溉曝气量的增加呈增大趋势。纵观整个生育期,高肥水平,高、中、低曝气灌溉处理和不曝气灌溉处理对番茄茎粗变化的影响较小;中、低肥水平,随着植株的生长,高、中、低曝气灌溉和不曝气灌溉处理的番茄植株茎粗差异较大。定植 50 d 之前,曝气灌溉处理对番茄茎粗的影响不显著($P>0.05$),定植 50 d 后各处理的茎粗差异开始逐

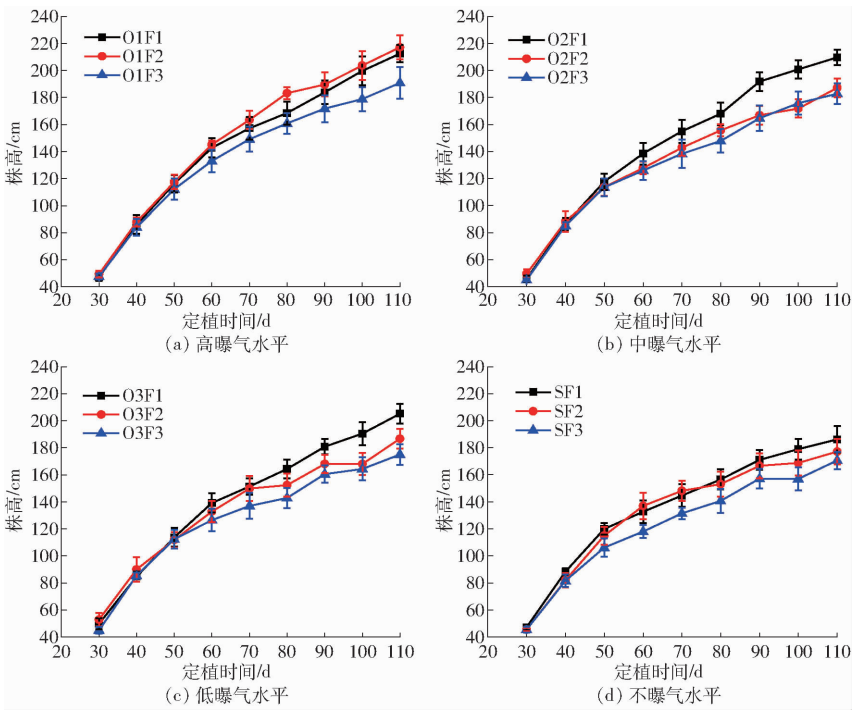


图 2 施肥处理温室番茄株高的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of greenhouse tomato plant height under fertilization treatment

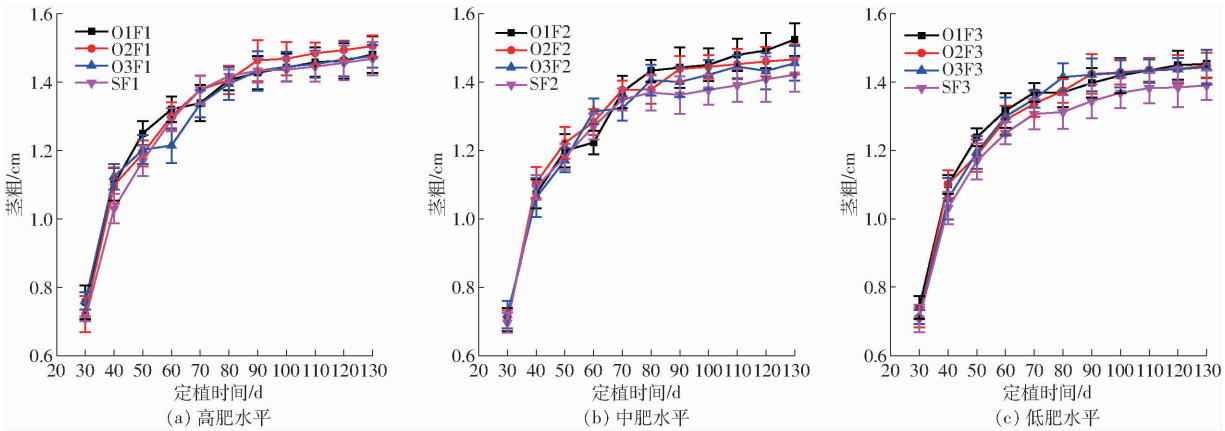


图 3 曝气灌溉处理温室番茄茎粗的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of greenhouse tomato stem diameter under aerated irrigation treatment

渐明显,定植 50 ~ 70 d、70 ~ 90 d 番茄茎粗差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

由表 3 可知,番茄定植后 30 ~ 50 d 期间,曝气灌溉处理和不曝气灌溉处理番茄茎粗的日增长量差异不显著,定植后 50 ~ 70 d、70 ~ 90 d 差异性达显著水平,其原因是随着植株不断生长,植物根系对氧气的需求量逐渐增大,土壤含氧量对植物生长发育的影响显现,在番茄生育中期(定植后 50 ~ 90 d),其茎粗的日均增长量最大,曝气灌溉对番茄茎粗的影响显著。定植后 90 ~ 130 d 是生育末期,这一阶段番茄处于果实采收期,番茄茎粗的日均增长量明显放缓,曝气灌溉对这一阶段番茄茎粗的影响不显著,由此可见,曝气灌溉处理在番茄生育中期对茎粗增长有显著影响。

		表 3 茎粗分段日均增长量				
		Tab.3 Per-day growth of stem width of tomato				
		mm				
处理	定植时间/d					
	30 ~ 50	50 ~ 70	70 ~ 90	90 ~ 110	110 ~ 130	
O1F1	0.237	0.074	0.035	0.016	0.010	
O1F2	0.247	0.086	0.035	0.018	0.022	
O1F3	0.239	0.076	0.024	0.019	0.009	
O2F1	0.245	0.083	0.043	0.010	0.011	
O2F2	0.261	0.077	0.031	0.007	0.007	
O2F3	0.237	0.075	0.044	0.006	0.007	
O3F1	0.221	0.072	0.048	0.010	0.011	
O3F2	0.225	0.076	0.039	0.022	0.006	
O3F3	0.237	0.078	0.032	0.016	0.005	
SF1	0.241	0.071	0.028	0.016	0.012	
SF2	0.243	0.064	0.017	0.014	0.015	
SF3	0.235	0.062	0.019	0.019	0.005	

图 4 为施肥处理温室番茄全生育期内茎粗的变化曲线,从图中可看出,各试验处理的番茄茎粗均随生育期的推进呈逐渐增大趋势,高曝气灌溉水平下,中肥处理番茄茎粗最高,高肥处理其次,低肥处理最低;中曝气灌溉和低曝气灌溉水平,高肥处理番茄茎粗最大,中肥处理其次,低肥处理最小。说明高曝气灌溉水平,中肥处理促进番茄植株茎粗的增大效果最好,中、低曝气灌溉水平,高肥处理促进番茄植株

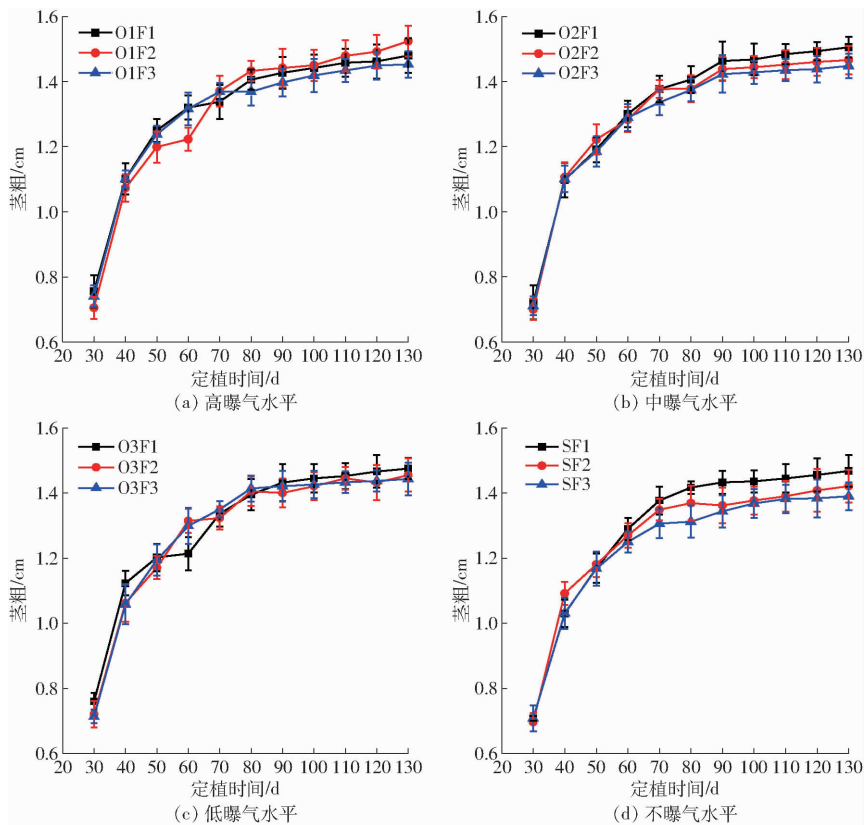


图 4 施肥处理温室番茄茎粗的变化曲线

Fig.4 Variation curves of greenhouse tomato stem diameter under fertilization treatment

曝气灌溉不同施肥水平对番茄株高、茎粗的影响见表 4,从表 4 可看出,同一施肥水平下,曝气灌溉处理的番茄株高、茎粗均大于不曝气灌溉处理,番茄株高和茎粗均随曝气量的增加呈增大趋势,且曝气灌溉对株高、茎粗的影响极显著($P < 0.01$)。高肥水平,高、中、低曝气灌溉处理番茄株高较不曝气灌溉处理分别显著增大 14.12%、12.6%、10.2%,茎粗较不曝气灌溉处理分别增大 0.68%、2.52%、0.48%;中肥水平,高、中、低曝气灌溉处理番茄株高较不曝气灌溉处理分别显著增大 22.57%、5.64%、5.36%,茎粗较不曝气灌溉处理分别增大 7.25%、3.17%、2.39%;低肥水平,高、中、低曝气灌溉处理番茄株高较不曝气灌溉处理分别显著增大 11.77%、7.09%、2.52%,茎粗较不加气灌溉处理分别增大 4.53%、4.17%、3.81%。施肥水平对番茄株高和茎粗影响极显著($P < 0.01$),高曝气灌溉水

茎粗增大效果最好。定植 30 ~ 90 d 是番茄茎粗的快速生长阶段,定植 90 ~ 130 d,番茄生长后期茎粗的增长明显放缓。定植 30 ~ 50 d 曝气灌溉处理下不同施肥处理对番茄茎粗的影响不显著($P > 0.05$),定植后 50 d 各处理的茎粗差异逐渐开始明显,定植后 50 ~ 90 d 番茄茎粗差异显著($0.01 < P < 0.05$),定植 130 d 番茄茎粗差异达极显著($P < 0.01$)。

平,中肥处理番茄株高和茎粗均达最大值,较高肥处理分别显著增大 2.21% 和 3.11%,较低肥处理分别显著增大 13.83% 和 4.89%。在交互作用下,曝气和施肥对番茄株高有显著性影响($P < 0.05$),对番茄茎粗无显著影响($P > 0.05$)。

2.2 肥气耦合处理对番茄光合特性的影响

肥气耦合处理对番茄光合特性的影响见表 5,开花坐果期和果实膨大期两次测定结果均表明曝气灌溉处理净光合速率 P_n 高于不曝气灌溉处理。在开花坐果期,同一施肥水平下,曝气灌溉处理 P_n 变化趋势相同,均随曝气量的升高而增大,高曝气灌溉处理番茄 P_n 最高,其次是中曝气灌溉处理,低曝气灌溉处理最低。而在果实膨大期,同一施肥水平下,除低肥水平时中曝气灌溉处理 P_n 略低于低曝气灌溉处理,高肥、中肥水平各处理 P_n 变化趋势相同,均随曝气量的升高而增大。且开花坐果期和果实膨

表 4 肥气耦合处理对温室番茄株高、茎粗的影响

Tab. 4 Effects of fertilizer-air coupling treatment on plant height and stem diameter in greenhouse tomato										
处理	株高/cm					茎粗/cm				
	O1	O2	O3	S	平均值	O1	O2	O3	S	平均值
F1	212. 5	209. 7	205. 2	186. 2	203. 4 ^a	1. 478	1. 505	1. 475	1. 468	1. 48 ^a
F2	217. 2	187. 2	186. 7	177. 2	192. 0 ^a	1. 524	1. 466	1. 455	1. 421	1. 47 ^{ab}
F3	190. 8	182. 8	175. 0	170. 7	179. 8 ^b	1. 453	1. 448	1. 443	1. 390	1. 43 ^b
平均值	206. 8 ^a	193. 2 ^{ab}	188. 9 ^{bc}	178. 0 ^c		1. 49 ^a	1. 47 ^{ab}	1. 46 ^{ab}	1. 43 ^b	
F	曝气量		28. 33 ^{**}					7. 11 ^{**}		
	施肥量		36. 82 ^{**}					8. 96 ^{**}		
	曝气量×施肥量		3. 15 [*]					1. 89		

注:同列数据后不同字母表示差异达显著性水平($P<0.05$), * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

表 5 肥气耦合处理对温室番茄光合特性的影响

Tab.5 Effects of different fertilizer-air coupling treatment on photosynthetic parameters in greenhouse tomato													
处理	$P_n/$		$G_s/$		$C_i/$		$T_r/$		$WUE/$		L_s		
	$(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		$(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		$(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$		$(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		$(\text{mmol}\cdot\text{mmol}^{-1})$				
	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	
O1F1	21.4 ^{ab}	20.4 ^{ab}	471.3 ^{ab}	363.0 ^a	283.7 ^{ab}	196.0 ^{ab}	5.83 ^{ab}	4.25 ^a	3.50 ^{ab}	5.25 ^{ab}	0.27 ^{ab}	0.34 ^{ab}	
O1F2	23.9 ^a	21.1 ^a	513.7 ^a	377.5 ^a	292.3 ^a	227.0 ^a	6.53 ^a	3.80 ^{ab}	3.80 ^a	5.95 ^a	0.31 ^a	0.38 ^a	
O1F3	20.8 ^{ab}	19.6 ^{ab}	456.3 ^{ab}	330.0 ^{ab}	277.0 ^{abc}	189.5 ^{ab}	5.53 ^{ab}	3.75 ^{ab}	3.23 ^{ab}	5.05 ^{abc}	0.25 ^{ab}	0.33 ^{ab}	
O2F1	21.2 ^{ab}	19.7 ^{ab}	412.0 ^{abc}	351.5 ^a	285.0 ^{ab}	171.5 ^b	5.67 ^{ab}	3.55 ^{abc}	3.27 ^{ab}	5.00 ^{abcd}	0.29 ^{ab}	0.30 ^{ab}	
O2F2	19.7 ^{bc}	18.6 ^{abc}	455.6 ^{ab}	372.5 ^a	254.0 ^{bcd}	191.0 ^{ab}	5.30 ^{bc}	4.00 ^{ab}	3.37 ^{ab}	4.95 ^{abcd}	0.27 ^{ab}	0.26 ^{ab}	
O2F3	18.8 ^{bcd}	16.7 ^{bcde}	429.3 ^{abc}	250.0 ^{cd}	258.3 ^{bcd}	185.5 ^{ab}	5.23 ^{bc}	3.35 ^{bcd}	3.03 ^{ab}	4.5 ^{bcd}	0.25 ^{ab}	0.27 ^{ab}	
O3F1	20.8 ^{ab}	18.8 ^{abc}	434.0 ^{abc}	267.0 ^{bcd}	268.3 ^{abc}	187.5 ^{ab}	5.53 ^{ab}	3.45 ^{bc}	3.17 ^{ab}	5.25 ^{ab}	0.29 ^a	0.29 ^{ab}	
O3F2	19.7 ^{bc}	18.2 ^{abc}	420.3 ^{abc}	306.0 ^{abc}	256.3 ^{bcd}	182.0 ^{ab}	5.13 ^{bc}	3.40 ^{bcd}	3.10 ^{ab}	5.20 ^{ab}	0.27 ^{ab}	0.26 ^{ab}	
O3F3	17.4 ^{bcde}	16.9 ^{bcde}	415.0 ^{abc}	238.0 ^{cd}	251.0 ^{bcd}	176.5 ^{ab}	4.80 ^{bc}	3.35 ^{bcd}	3.00 ^{ab}	4.25 ^{bcd}	0.25 ^{ab}	0.24 ^{ab}	
SF1	16.3 ^{cde}	15.6 ^{cde}	374.0 ^{bc}	257.5 ^{bcd}	268.7 ^{abc}	179.0 ^{ab}	5.13 ^{bc}	2.95 ^{cd}	2.93 ^{ab}	4.15 ^{bcd}	0.23 ^{ab}	0.26 ^{ab}	
SF2	14.9 ^{de}	14.6 ^{de}	358.7 ^{bc}	212.0 ^d	247.7 ^{cd}	172.0 ^b	4.73 ^{bc}	2.80 ^{cd}	2.90 ^{ab}	3.90 ^{cd}	0.21 ^{ab}	0.23 ^{ab}	
SF3	14.4 ^e	13.8 ^e	318.0 ^c	222.5 ^d	230.3 ^d	168.0 ^b	4.37 ^c	2.65 ^d	2.77 ^{ab}	3.80 ^d	0.18 ^b	0.20 ^b	
F	曝气量	15.34 ^{**}	23.66 ^{**}	5.54 ^{**}	17.32 ^{**}	6.56 ^{**}	2.18	7.03 ^{**}	14.12 ^{**}	3.52 [*]	8.78 ^{**}	3.17 [*]	2.85
	施肥量	3.07	0.96	0.67	7.03 [*]	4.91 [*]	0.76	3.11	1.75	1.39	3.32	1.56	0.53
	曝气量×施肥量	0.71	1.82	0.27	1.70	0.92	0.53	0.76	0.86	0.21	0.60	0.18	0.16

注:BEP、FEP 分别表示开花坐果期和果实膨大期,下同。

大期内,高肥水平下,高曝气灌溉处理 P_n 分别较不曝气处理提高 31.28% 和 30.77%,平均提高 31.03%;中肥水平,开花坐果期和果实膨大期高曝气处理 P_n 分别较不曝气处理提高 60.40% 和 44.52%,平均提高 52.46%;低肥水平,开花坐果期和果实膨大期高曝气处理 P_n 分别较不曝气处理提高 44.44% 和 42.03%,平均提高 43.24%。开花坐果期番茄叶片气孔导度 G_s 大于果实膨大期,同一施肥水平下,开花坐果期 G_s 随曝气量的升高先减小后增大,果实膨大期, G_s 随曝气量的升高而增大。中肥水平, G_s 峰值出现在高曝气灌溉处理,分别较不曝气灌溉增大 43.21% 和 78.07%,平均增大 60.64%。开花坐果期 C_i 均高于果实膨大期,开花坐果期和果实膨大期两次测定结果均表明曝气灌溉处理番茄叶片 C_i 高于不曝气灌溉处理。且 C_i 的最大值均出现于高曝气中肥灌溉处理,分别较不曝气灌溉增大

18.01% 和 31.98%,平均增大 25.00%。曝气灌溉处理 T_r 高于不曝气灌溉处理,同一施肥水平下,开花坐果期和果实膨大期 T_r 均随曝气量的升高呈逐渐增大趋势。高肥水平, T_r 峰值出现在高曝气灌溉处理,开花坐果期和果实膨大期 T_r 分别较不曝气灌溉处理提高 13.65% 和 44.07%,平均提高 28.86%;中肥水平, T_r 峰值出现在高曝气处理,开花坐果期和果实膨大期 T_r 分别较不曝气处理提高 38.05% 和 35.71%,平均提高 36.88%。在开花坐果期, WUE 随曝气量的升高而升高,高肥水平下, WUE 由不曝气处理的 2.93 mmol/mol 升高至高曝气处理的 3.5 mmol/mol,中肥水平,高曝气灌溉处理较不曝气处理 WUE 提高 31.03%,低肥水平, WUE 由不曝气处理的 2.77 mmol/mol 升高至高曝气处理的 3.23 mmol/mol,果实膨大期测定结果表明番茄曝气灌溉处理 WUE 均高于不曝气灌溉处理。

开花坐果期和果实膨大期两次测定结果表明番茄曝气灌溉处理下 L_s 均高于不曝气灌溉处理,开花坐果期和果实膨大期 L_s 峰值均出现在高曝气中肥处理。方差分析表明,曝气处理对两个生育阶段内番茄叶片 P_n 、 G_s 、 C_i (FEP 除外) 和 T_r 均有极显著影响 ($P < 0.01$),对果实膨大期 T_r 及 WUE 有极显著影响 ($P < 0.01$),对开花坐果期 WUE 及 L_s 有显著影响 ($P < 0.05$)。施肥处理对开花坐果期番茄 C_i 和果实膨大期 G_s 有显著影响 ($P < 0.05$),对开花坐果期和果实膨大期番茄叶片 T_r 、 WUE 及 L_s 均影响不显著 ($P > 0.05$)。两因素交互作用对两个生育阶段内番茄 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 、 WUE 及 L_s 均无显著影响 ($P > 0.05$)。

2.3 肥气耦合处理对番茄功能叶片光合色素的影响

肥气耦合处理对番茄功能叶片光合色素含量(质量比)的影响见表 6。开花坐果期和果实膨大期

两次测定结果均表明曝气灌溉处理番茄叶片叶绿素 a 含量高于不曝气灌溉处理,同一施肥水平下,叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均随曝气量的增大呈逐渐增大趋势,高曝气灌溉处理叶绿素 a 和叶绿素 b 含量最高,其次是中曝气灌溉处理,低曝气灌溉处理最低。开花坐果期和果实膨大期,高曝气灌溉处理较不曝气灌溉处理叶绿素 a 含量分别最大提高 38.33% 和 28.00%,平均提高 33.17%,叶绿素 b 含量分别最大提高 54.55% 和 42.86%,平均提高 48.71%。高曝气灌溉水平下,中肥处理番茄叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量最高,高肥处理其次,低肥处理最低;中曝气灌溉和低曝气灌溉水平,高肥处理番茄叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量最高,中肥处理其次,低肥处理最低,与温室番茄植株株高和茎粗变化规律一致。

表 6 肥气耦合处理对番茄功能叶片光合色素含量的影响
Tab. 6 Effects of fertilizer-air coupling treatment on photosynthetic pigment content of greenhouse tomato functional leaves

处理	叶绿素 a 含量		叶绿素 b 含量		总叶绿素含量	
	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP
O1F1	0.76 ^{ab}	0.90 ^{ab}	0.32 ^{ab}	0.45 ^{ab}	1.08 ^{ab}	1.35 ^b
O1F2	0.83 ^a	0.96 ^a	0.34 ^a	0.50 ^a	1.17 ^a	1.47 ^a
O1F3	0.74 ^{abc}	0.87 ^{abcd}	0.30 ^{abc}	0.41 ^{bc}	1.03 ^{abc}	1.28 ^{bc}
O2F1	0.74 ^{abc}	0.89 ^{abc}	0.28 ^{abcd}	0.41 ^{bc}	1.02 ^{bcd}	1.30 ^b
O2F2	0.72 ^{bc}	0.87 ^{abcd}	0.26 ^{bcd}	0.39 ^{bcd}	0.98 ^{bcd}	1.26 ^{bcd}
O2F3	0.70 ^{bcd}	0.83 ^{bcd}	0.24 ^{cde}	0.40 ^{bcd}	0.93 ^{cde}	1.23 ^{bcd}
O3F1	0.70 ^{bcd}	0.83 ^{bcd}	0.27 ^{abcde}	0.40 ^{bcd}	0.97 ^{bcd}	1.23 ^{bcd}
O3F2	0.66 ^{bcd}	0.82 ^{bcd}	0.24 ^{cde}	0.35 ^{cd}	0.90 ^{cdef}	1.17 ^{cde}
O3F3	0.68 ^{bcd}	0.76 ^{de}	0.23 ^{cde}	0.40 ^{bcd}	0.92 ^{cde}	1.16 ^{cde}
SF1	0.63 ^{cde}	0.77 ^{cde}	0.25 ^{cde}	0.37 ^{cd}	0.88 ^{def}	1.14 ^{def}
SF2	0.60 ^{de}	0.75 ^{de}	0.22 ^{de}	0.35 ^{cd}	0.81 ^{ef}	1.10 ^{ef}
SF3	0.56 ^e	0.70 ^e	0.20 ^e	0.33 ^d	0.77 ^f	1.04 ^f
曝气量	16.55 ^{**}	11.31 ^{**}	10.24 ^{**}	12.49 ^{**}	20.00 ^{**}	27.51 ^{**}
F 施肥量	1.74	3.26	2.46	0.97	2.98	5.36 [*]
曝气量×施肥量	0.82	0.27	0.30	2.20	0.83	1.55

开花坐果期和果实膨大期,曝气灌溉处理总叶绿素含量均高于不曝气灌溉处理,同一施肥水平下,总叶绿素含量均随曝气量的升高呈增大趋势。开花坐果期,总叶绿素含量在高曝气灌溉中肥处理达最大值 1.17 mg/g,在不曝气灌溉低肥处理达最小值 0.77 mg/g;果实膨大期,总叶绿素含量在高曝气中肥处理达最大值 1.47 mg/g,在不曝气灌溉低肥处理达最小值 1.04 mg/g。开花坐果期和果实膨大期的峰值均出现于高曝气中肥灌溉处理,较不曝气灌溉处理总叶绿素含量分别升高 44.44% 和 33.64%。

方差分析表明,开花坐果期和果实膨大期,曝气处理对番茄叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含

量均有极显著影响 ($P < 0.01$);开花坐果期,施肥处理对番茄叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量影响均不显著 ($P > 0.05$),果实膨大期,施肥处理对番茄叶片总叶绿素含量有显著影响 ($P < 0.05$),对番茄叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量影响均不显著 ($P > 0.05$)。两因素交互作用对开花坐果期和果实膨大期叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量影响均不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 肥气耦合处理对番茄干物质积累量的影响

表 7 为肥气耦合处理对温室番茄植株开花坐果期和果实膨大期各部分干物质累积量的影响。由表可知,开花坐果期各试验处理番茄不同部位

干物质积累量由大到小依次为叶、茎、果和根。果实膨大期各处理番茄不同部位干物质积累量由大到小依次为果、茎、叶和根。在同一施肥水平下,开花坐果期和果实膨大期曝气处理番茄干物质积累总量均高于不曝气处理,高曝气灌溉处理干物质积累总量较不曝气灌溉处理分别最大提高31.66%和36.95%,干质量积累总量总体上均随曝气量升高呈升高趋势,高曝气灌溉处理干物质积累总量最高。开花坐果期内,除低曝气灌溉高

肥处理干物质积累总量略低于低曝气中肥处理外,同一曝气水平下,干质量积累总量总体上随施肥量升高呈升高趋势,高曝气高肥处理较中曝气中肥处理和高曝气低肥处理干质量积累总量提高3.61%和11.89%。果实膨大期,同一曝气水平下干质量积累总量总体上随施肥量升高呈先升高后降低趋势,中肥处理干质量积累总量最大,高曝气中肥处理果实干物质质量和干质量积累总量较高曝气低肥处理分别提高26.36%和19.13%。

表 7 肥气耦合处理对温室番茄植株各组成部分干物质积累量的影响

Tab.7 Effects of different fertilizer-air coupling treatments on dry matter partitioning of greenhouse tomato g										
处理	根干物质积累量		茎干物质积累量		叶干物质积累量		果干物质积累量		干物质积累总量	
	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP	BEP	FEP
O1F1	2.04 ^a	3.26 ^{ab}	40.13 ^a	59.58 ^a	45.72 ^a	36.43 ^{abc}	4.71 ^a	72.71 ^b	92.60 ^a	171.99 ^{ab}
O1F2	1.87 ^{ab}	3.39 ^a	39.38 ^a	60.92 ^a	44.56 ^a	44.91 ^a	3.56 ^{ab}	79.90 ^a	89.37 ^a	189.12 ^a
O1F3	1.30 ^{cd}	2.57 ^{cde}	35.46 ^{ab}	52.43 ^b	43.35 ^a	40.63 ^{ab}	2.65 ^{abc}	63.23 ^{bcd}	82.77 ^{ab}	158.87 ^{abc}
O2F1	1.87 ^{ab}	2.78 ^{bcd}	40.06 ^a	44.98 ^{cd}	38.88 ^b	36.64 ^{abc}	3.68 ^{ab}	66.62 ^{bc}	84.49 ^{ab}	151.02 ^{bc}
O2F2	1.66 ^{bc}	2.92 ^{abc}	36.39 ^{ab}	50.10 ^{abc}	36.82 ^{bcd}	41.28 ^a	4.34 ^a	71.27 ^b	79.20 ^{ab}	165.57 ^{ab}
O2F3	1.4 ^{bcd}	2.52 ^{cde}	32.87 ^{abc}	48.66 ^{bc}	35.60 ^{cd}	32.01 ^c	2.01 ^c	65.06 ^{bc}	71.88 ^{abc}	148.25 ^{bc}
O3F1	1.8 ^{ab}	2.53 ^{cde}	27.87 ^{bcd}	39.68 ^d	38.22 ^b	36.81 ^{abc}	3.41 ^{ab}	52.13 ^{cde}	71.31 ^{abc}	131.15 ^{cde}
O3F2	1.62 ^{bc}	2.46 ^{cde}	30.70 ^{bc}	44.27 ^{cd}	38.10 ^b	34.91 ^{bc}	2.57 ^{abc}	62.98 ^{bcd}	72.99 ^{abc}	144.62 ^{bcd}
O3F3	1.23 ^d	2.26 ^{de}	28.94 ^{bc}	46.31 ^{bcd}	34.85 ^{cd}	31.96 ^c	1.82 ^c	43.18 ^{de}	66.84 ^{bc}	123.72 ^{de}
SF1	1.6 ^{bc}	2.44 ^{cde}	29.77 ^{bc}	40.70 ^d	36.85 ^{bcd}	31.95 ^c	2.76 ^{abc}	53.35 ^{cde}	70.98 ^{abc}	128.44 ^{cde}
SF2	1.67 ^{bc}	2.35 ^{de}	26.41 ^{cd}	43.85 ^{cd}	37.58 ^{bc}	33.21 ^{bc}	2.22 ^{bc}	58.68 ^{bcd}	67.88 ^{bc}	138.10 ^{bcd}
SF3	1.36 ^{bcd}	1.82 ^e	23.18 ^d	45.38 ^{cd}	36.2 ^{bcd}	31.62 ^c	2.25 ^{bc}	41.52 ^e	62.99 ^c	120.34 ^{de}
曝气量	5.15 ^{**}	13.67 ^{**}	4.61 [*]	9.32 ^{**}	3.72 [*]	8.01 ^{**}	2.54	10.51 ^{**}	4.62 [*]	7.87 ^{**}
F 施肥量	2.44	5.56 [*]	3.33	3.87 [*]	1.55	3.08	1.76	3.68 [*]	1.65	2.82
曝气量×施肥量	0.85	3.15 [*]	2.07	1.66 [*]	0.63	1.22	0.58	1.77	0.72	1.04

方差分析表明,开花坐果期,曝气处理对番茄根干物质积累量有极显著影响($P<0.01$),对茎、果和干物质积累总量有显著影响($P<0.05$);施肥处理除对番茄根干物质积累量影响显著($P<0.05$),对茎、叶和果干物质积累总量均影响不显著($P>0.05$)。果实膨大期,曝气处理对番茄根、茎、叶和果干物质积累总量均有极显著影响($P<0.01$);施肥处理除对番茄根、茎和果干物质积累量有显著影响($P<0.05$),对叶和干物质积累总量影响不显著

($P>0.05$)。两因素交互作用对果实膨大期根、茎干物质积累量影响显著($P<0.05$)。

2.5 肥气耦合处理对番茄产量的影响

表8为肥气耦合处理对番茄单株产量和单果质量的影响。由表可知,同一施肥水平下,除中曝气灌溉中肥处理番茄单株产量略低于低曝气灌溉中肥处理外,番茄单株产量和单果质量均随曝气量的升高呈升高趋势,最高单株产量出现在高曝气灌溉中肥处理,最低单株产量出现在低曝气灌溉低肥处理,最

表 8 肥气耦合处理温室番茄单株产量和单果质量

Tab.8 Yield and fruit quality of greenhouse tomato under fertilizer and air coupling treatment g										
处理	单株产量					单果质量				
	O1	O2	O3	S	平均值	O1	O2	O3	S	平均值
F1	1 497.89	1 486.11	1 444.95	1 381.06	1 452.50 ^a	93.62	94.90	87.57	89.39	91.37 ^{ab}
F2	1 635.16	1 440.34	1 449.54	1 350.87	1 468.98 ^a	104.15	92.93	90.60	87.15	93.71 ^a
F3	1 454.00	1 399.68	1 279.83	1 330.57	1 366.02 ^b	93.21	87.48	83.65	83.16	86.87 ^b
平均值	1 529.02 ^a	1 442.04 ^b	1 391.44 ^{bc}	1 354.17 ^c		96.99 ^a	91.77 ^{ab}	87.27 ^b	86.57 ^b	
曝气量			11.39 ^{**}					6.76 ^{**}		
F 施肥量			8.11 ^{**}					4.69 [*]		
曝气量×施肥量			1.89					0.88		

高单果质量出现在高曝气灌溉中肥处理,最低单果质量出现在低曝气低肥处理。高肥水平,高曝气灌溉处理单株产量和单果质量较不曝气灌溉处理提高 8.46% 和 4.73%。中肥水平,高曝气灌溉处理单株产量和单果质量较不曝气灌溉处理提高 12.80% 和 19.51%。低肥水平,高曝气灌溉处理单株产量和单果质量较不曝气灌溉处理提高 9.28% 和 12.09%。单因素中曝气处理对番茄单株产量和单果质量均有极显著影响($P < 0.01$),施肥处理对单株产量有极显著影响($P < 0.01$),对单果质量有显著影响($0.01 < P < 0.05$),双因素交互作用对番茄单株产量和单果质量均影响不显著($P < 0.01$)。

表 9 表明,各曝气水平下,曝气灌溉处理番茄单株产量与植株的株高、茎粗和净光合速率相关系数较不曝气灌溉处理高,随着曝气量的升高,番茄产量与植株各生长指标相关性也呈升高趋势。高曝气灌

溉处理番茄产量与植株各生长指标相关系数最高,为 0.4 左右,而中、低曝气灌溉处理相关系数差异不大,均为 0.3 左右。由此可知,高曝气灌溉处理番茄产量与植株各生长指标相关性相较于中、低曝气灌溉处理高,由大到小依次为净光合速率、株高和茎粗。各施肥水平下,中肥处理番茄产量与植株各生长指标相关系数最高,高肥处理次之,低肥处理相关系数最低。循环曝气地下滴灌肥气耦合下,全部处理的番茄产量与植株的株高、茎粗和净光合速率均呈现极显著正相关关系($P < 0.01$),番茄产量与株高相关系数最大,为 0.473,与净光合速率相关系数次之,为 0.427,与植株茎粗相关系数最小,为 0.377。由此可知,肥气耦合条件下番茄产量与植株各生长指标的相关系数差异较大,番茄产量与植株各生长指标相关性由大到小依次为株高、净光合速率和茎粗。

表 9 各试验处理条件下温室番茄单株产量与植株的株高、茎粗、净光合速率的相关系数
Tab.9 Correlation coefficients among fruit yield ,plant height ,stem diameter and photosynthetic rate

处理	测定指标	株高	茎粗	净光合速率	产量	处理	测定指标	株高	茎粗	净光合速率	产量
O1	株高	1	0.501 **	0.437 **	0.378 **	F1	株高	1	0.403 *	0.464 *	0.376 *
	茎粗		1	0.253 *	0.342 *		茎粗		1	0.138	0.347 *
	净光合速率			1	0.453 **		净光合速率			1	0.394 **
	产量				1		产量				1
O2	株高	1	0.296 *	0.382 **	0.383 *	F2	株高	1	0.474 **	0.521 **	0.502 **
	茎粗		1	0.285 *	0.293 *		茎粗		1	0.263 *	0.334 *
	净光合速率			1	0.345 *		净光合速率			1	0.422 **
	产量				1		产量				1
O3	株高	1	0.227	0.330 *	0.316 *	F3	株高	1	0.340 *	0.424 **	0.285 *
	茎粗		1	0.129	0.211		茎粗		1	0.170	0.208
	净光合速率			1	0.353 *		净光合速率			1	0.309 *
	产量				1		产量				1
S	株高	1	0.129	0.185	0.247 *	全部	株高	1	0.572 **	0.490 **	0.473 **
	茎粗		1	-0.008	0.208		茎粗		1	0.249 *	0.377 **
	净光合速率			1	0.370 *		净光合速率			1	0.427 **
	产量				1		产量				1

3 讨论

已有研究表明曝气地下滴灌可以改善作物根区土体内氧气含量,有效缓解土壤的低氧胁迫,从而促进土壤呼吸^[15],土壤缺氧环境的改善对作物的生长有积极影响,促进作物植株的生长发育^[28]。LI 等^[29]通过试验向土壤中加气,研究发现曝气处理的番茄株高和茎粗均较不曝气处理显著增大。朱艳等^[25]对番茄进行曝气处理发现,茎粗和叶面积对加气灌溉存在极显著的积极响应,加气灌溉处理番茄植株茎粗和叶面积较不加气灌溉处理分别显著增大 4.55% 和 16.21%。BHATTARAI 等^[30]研究也表明加气灌溉处

理棉花植株的茎粗显著增大了 6.86%。本试验中番茄植株在高、中、低 3 个曝气水平下株高和茎粗较不曝气灌溉处理增长极显著,株高分别最大显著增长 14.12%、22.57% 和 11.78%,茎粗分别最大显著增大 2.52%、7.24% 和 4.53%,这与前人的研究结果相似。在曝气灌溉条件下,提高施肥量有利于植株株高和茎粗的生长^[31-32],但本试验在高曝气水平时,增加施肥量番茄株高、茎粗反而降低。说明低肥和高肥水平均抑制番茄的植株生长,中肥水平能显著促进番茄苗期生长发育,改善植株生长状况。这均表明曝气灌溉有效改善了作物根系的通气状况,进而对番茄生长发育产生了积极的影响作用。

光合作用利用叶绿素等光合色素,将二氧化碳和水转化为有机物并贮存起来。叶片气孔是作物进行气体交换的主要场所,蒸腾作用为水分、养分的吸收提供动力,净光合速率是光合作用强弱的一个重要反映^[33-34]。气孔导度表示植物气孔的开张程度,影响植物的蒸腾作用、光合作用和呼吸作用,温室番茄叶片的气孔导度除了受土壤水分的制约外,还受到气温和大气湿度等多种环境因子的影响^[29]。本试验表明,相较于不曝气处理,曝气处理下番茄叶片气孔导度增加,气孔限制值升高,胞间 CO₂ 浓度升高,蒸腾速率升高,与此同时,植株的净光合速率也升高。另一方面,根区加气处理使得叶绿素 a 和叶绿素 b 含量升高,叶绿素作为光合反应中心色素起着捕获光能和分离电荷的双重作用^[33]。因此,叶绿素含量的升高进一步促进了净光合反应速率的升高。本试验中开花坐果期和果实膨大期内曝气处理均能显著提高净光合速率。李元等^[20]发现,加气灌溉改善根区气体环境,能够显著提高番茄叶片叶绿素含量及光合反应速率,这与本试验得到循环曝气处理显著提高番茄叶片净光合速率相一致。试验中,开花坐果期和果实膨大期同一施肥水平下高曝气、中曝气处理气孔导度均较不曝气处理有显著提高,曝气处理有利于气孔的开放。该结果表明对根区土壤进行循环曝气在一定程度上促进植株叶片气孔的开放,有利于增加光合反应的原料(CO₂)。其次,开花坐果期和果实膨大期内叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量对曝气处理均有积极响应,相较于不曝气处理均有显著提高。然而,方差分析表明施肥处理对植株净光合速率影响不显著,这与赵策等^[31]发现施肥量对辣椒净光合速率有显著影响并不一致,这可能是施肥量设置水平不同以及试验材料不同引起的,其次,土壤质地不同也可能是造成结果不一致的主要原因,同时土壤中养分的不足或过量,在作物生长期,可能抑制了植物的各种生理过程,进而影响光合作用。曝气处理使番茄叶片叶绿素含量和气孔导度增加,促使净光合速率提高,因而植株干物质积累和产量增加。本试验中,曝气水平对开花坐果期和果实膨大期番茄根、茎、叶和果的干物质积累量均影响显著,曝气处理番茄根、茎、叶和果的干物质积累量较不曝气处理显著增大(表 7)。这之前研究得到根区加气能够提高作物产量、单果质量一致^[25]。

本试验发现(表 9),高曝气水平下番茄单株产量与植株的株高、茎粗和净光合速率均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),这表明高曝气处理番茄株高、茎粗及净光合速率与产量有密切关系。曝气

灌溉处理在改善土壤环境和作物根系生长的基础上,促进番茄植株株高、茎粗生长和光合作用,进而有利于植株各部位干物质积累,提高作物产量。相较于不曝气地下滴灌,曝气灌溉处理单株产量、单果质量分别显著增大 21.04%、11.14%。循环曝气地下滴灌肥气耦合处理中,高曝气灌溉处理和中肥处理番茄产量与植株的株高、茎粗和净光合速率相关系数最高(表 9)。由此可知,本试验中在中肥水平下进行高曝气灌溉对植株生长、番茄产量的积极影响效应更明显。BHATTARAI 等^[24,35]试验表明加气灌溉下温室番茄产量的增长主要归因于单果质量和果实干物质积累量的增加,与本研究结果一致。本试验中,番茄产量随曝气量的升高呈升高趋势,但随施肥量的升高呈先升高后降低的趋势,中肥水平下番茄产量最高,说明在保证曝气量相同的前提下高肥水平并没有促进产量增加。可能是由于高肥引起植株徒长,影响番茄开花结果,导致坐果率低,对番茄的单株产量产生不利作用,而低肥水平下的产量最低,说明在番茄的生长发育过程中过低的施肥量使得番茄处于缺少营养的状态,不利于作物果实产量的积累。曝气处理和施肥处理对温室番茄生长指标、单株产量和单果质量存在显著性影响,但影响规律并不一致,曝气处理影响较施肥处理高,温室番茄生长指标、单株产量和单果质量均随曝气量的升高呈升高趋势,随施肥量的升高呈先升高后降低的趋势,最佳曝气水平为高曝气水平,最佳施肥水平为中肥水平,双因素交互作用对单株产量和单果质量影响不显著,可能是曝气处理在不同施肥水平对温室番茄生长指标、单株产量和单果质量有不同影响,双因素同时作用较单一因素的影响减弱,交互作用抵消了各自单因素影响。综合分析番茄植株生长指标、光合特性、干物质积累量和番茄产量,高曝气灌溉中肥水平是本试验条件下温室番茄较优的曝气施肥模式。

4 结论

(1)循环曝气地下滴灌对温室番茄生长指标、光合作用均有显著影响,高曝气中肥处理番茄株高、茎粗、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量均高于其他试验处理。

(2)同一施肥水平下,曝气处理番茄干物质积累总量均高于不曝气处理,高曝气灌溉处理干物质积累总量较不曝气灌溉处理分别最大提高 31.66% 和 36.95%,高曝气灌溉处理干物质积累总量最高,低曝气灌溉处理最低。番茄单株产量和单果质量均

随曝气量的升高呈升高趋势,最高单株产量出现在高曝气灌溉中肥处理,最低单株产量出现在低曝气灌溉低肥处理,最高单果质量出现在高曝气灌溉中肥处理,最低单果质量出现在低曝气灌溉低肥处理。

(3)循环曝气地下滴灌肥气耦合下番茄单株产量与植株株高、茎粗和净光合速率均呈现极显著正相关($P < 0.01$),高曝气灌溉中肥处理番茄产量与植株

株高、茎粗和净光合速率相关系数高于其他试验处理。因此,综合考虑肥气耦合各试验处理对番茄植株生长特性、光合特性、干物质积累量和番茄产量的影响,高曝气灌溉中肥处理(掺气比例 16.25%,N、 P_2O_5 、 K_2O 施加量为 180、90、112.5 kg/hm²)是本试验推荐的山东地区温室番茄较优的肥气耦合灌溉模式。

参 考 文 献

- [1] SEY B K, MANCEUR A M, WHALEN J K, et al. Root derived respiration and nitrous oxide production as affected by crop phenology and nitrogen fertilization[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 369–379.
- [2] 黄兴法,李光永.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].*农业工程学报*, 2002, 18(2): 176–181.
HUANG Xingfa, LI Guangyong. Present situation and development of subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 176–181. (in Chinese)
- [3] 田富强,温洁,胡宏昌,等.滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J].*水利学报*, 2018, 49(1): 126–135.
TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 126–135. (in Chinese)
- [4] NIU W Q, FAN W T, PERSAUD N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 790–798.
- [5] 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 oxygation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 439–450.
- [6] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertisol[J]. *Crop and Pasture Science*, 2014, 64(12): 1171–1181.
- [7] MACHADO R M A, ROSARIO M, DO OLIVEIRA G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation[M]//ABE J. *Roots: the dynamic interface between plants and the earth*. Springer Netherlands, 2003: 333–341.
- [8] PAYERO J O, TARKALSON D D, IRMAK S, et al. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8): 895–908.
- [9] TAKESHI F, JULIA B S. Plant responses to hypoxia—is survival a balancing act? [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(9): 449–456.
- [10] BHATTARAI S P, SU N, MIDMORE D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 313–377.
- [11] 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.
GUO Chao, NIU Wenquan. Effects of rhizosphere ventilation on growth and root activity of potted maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1194–1198. (in Chinese)
- [12] BAGATUR T. Evaluation of plant growth with aerated irrigation water using venturi pipe part[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(4): 2525–2533.
- [13] SHAHIEN M M, ABUARAB M E, MAGDY E. Root aeration improves yield and water use efficiency of irrigated potato in sandy clay loam soil[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2014, 2(10): 310–320.
- [14] ABUARAB M, MOSTAFA E, IBRAHIM M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. *Journal of Advanced Research*, 2013, 4(6): 493–499.
- [15] CHEN X, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(4): 236–248.
- [16] GOORAHOO D, CARSTENSEN G, ZOLDOSKE D F, et al. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers[J]. *Int. Water Irrig.*, 2002, 22(2): 39–42.
- [17] TORABI M, MIDMORE D J, WALSH K B, et al. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygation[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 621–630.
- [18] 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
NIU Wenquan, GUO Chao. Effects of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2785–2791. (in Chinese)
- [19] 陈新明, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, 等.加氧灌溉对菠萝根区土壤呼吸和生理特性的影响[J].*排灌机械工程学报*, 2010, 28(6): 543–547.
CHEN Xinming, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration and crop physiological

- characteristics in pineapple[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6): 543 – 547. (in Chinese)
- [20] 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. LI Yuan, NIU Wenquan, LÜ Wang, et al. Aerated irrigation improving photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of greenhouse tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 125 – 132. (in Chinese)
- [21] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 258 – 265. YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen application amounts for spring maize based on evaluation model in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 258 – 265. (in Chinese)
- [22] 张智, 李曼宁, 杨志, 等. 基于多指标协同的草莓水肥耦合综合调控[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 267 – 276. ZHANG Zhi, LI Manning, YANG Zhi, et al. Comprehensive regulation of water and fertilizer coupling based on multi index collaboration of strawberry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 267 – 276. (in Chinese)
- [23] 李元, 牛文全, 许建, 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. LI Yuan, NIU Wenquan, XU Jian, et al. Aerated irrigation enhancing quality and irrigation water use efficiency of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 147 – 154. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] 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. ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199 – 211. (in Chinese)
- [26] 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. LEI Hongjun, ZANG Ming, ZHANG Zhenhua, et al. Impact of working pressure and surfactant concentration on air-water transmission in drip irrigation tape under cycle aeration[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 63 – 69. (in Chinese)
- [27] 刘家尧, 刘新. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [28] 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. LU Zehua, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Effects of rhizosphere ventilation at different growth stages on plant growth and yield of greenhouse tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(7): 1330 – 1337. (in Chinese)
- [29] LI Y, NIU W Q, XU J, et al. Root morphology of greenhouse produced muskmelon under subsurface drip irrigation with supplemental soil aeration[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201(30): 287 – 294.
- [30] BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Oxygation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, 51(7): 675 – 688.
- [31] 赵策, 田军仓, 欧阳赞, 等. 土壤水肥气热耦合对温室辣椒光合作用和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 31 – 37. ZHAO Ce, TIAN Juncang, OUYANG Zan, et al. Impact of water-fertilizer-air-heat coupling on photosynthetic and yield of pepper in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 31 – 37. (in Chinese)
- [32] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70 – 80. XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 70 – 80. (in Chinese)
- [33] GERISCHER H. Solar photoelectrolysis with semiconductor electrodes[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [34] 孙燕, 王怡琛, 王全九, 等. 增氧微咸水对小白菜光响应特征及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 116 – 123. SUN Yan, WANG Yichen, WANG Quanjiu, et al. Effects of oxygenated brackish water on light response characteristics and yield of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 116 – 123. (in Chinese)
- [35] 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, 2004, 144(3): 285 – 298.