

徐达勋. 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄产量、品质及光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 152-157.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.021

不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄产量、品质及光合作用的影响

徐达勋

(盐城生物工程高等职业技术学校, 江苏 盐城 224051)

摘要: 为了筛选出温室樱桃番茄的最佳增氧滴灌方法, 以樱桃番茄品种福特斯为试验材料, 分析了物理增氧滴灌(T1)、化学增氧滴灌(T2)和综合增氧滴灌(T3)3种方法对樱桃番茄根系生长、产量、品质及光合作用的影响。结果表明, 与常规滴灌(CK)相比, 增氧滴灌可提升灌溉水溶氧量, 促进温室樱桃番茄根系生长, 光合作用效率、产量、品质及水分利用率显著提升($P < 0.05$), 以综合增氧滴灌(T3)效果最佳。与CK相比, T3处理平均溶氧量、根系总根长、总根干质量、总根表面积、总根体积、平均直径、根尖数、根系活力、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)、结果数、单株产量、667 m²产量、水分利用率, 以及可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、 V_C 、番茄红素含量分别增加 29.88%、20.11%、16.71%、18.29%、26.67%、22.22%、20.23%、22.87%、11.24%、18.86%、8.72%、24.31%、12.6个、24.65%、21.78%、21.80%、8.68%、38.40%、37.63%、7.67%和12.41%; 可滴定酸含量降低19.23%, 单果质量无显著差异。

关键词: 增氧滴灌; 樱桃番茄; 产量; 品质; 光合作用

中图分类号: S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0152-06

Effects of different aerobic drip irrigation methods on yield, quality and photosynthesis of cherry tomato in greenhouse

XU Da-xun

(Yancheng Biological Engineering Higher Vocational Technology School, Yancheng 224051, China)

Abstract: To select the best method of aerobic drip irrigation for cherry tomato in greenhouse, Futesi was used as experimental material to study the effects of physical aerobic drip irrigation (T1), chemical aerobic drip irrigation (T2) and physicochemical aerobic drip irrigation (T3) on root growth, yield, quality and photosynthesis of cherry tomato in greenhouse. The results showed that, compared with the conventional drip irrigation (CK), aerobic drip irrigation could increase irrigation water-soluble oxygen content and promote root growth of cherry tomato in greenhouse. Furthermore, the photosynthetic efficiency, yield, quality and water use efficiency were also significantly increased ($P < 0.05$). The effects of T3 treatment was the best. Compared with conventional drip irrigation, the average irrigation water-soluble oxygen content, total root length, total root dry weight, total root surface area, total root volume, average diameter, number of root tips, root activity, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), inter cellular CO_2 concentration (C_i), transpiration rate (T_r), number of fruit per plant, yield per plant, yield per 667 m², water use efficiency and the contents of soluble sugar, soluble protein, soluble solids, V_C and lycopene in the treatment of T3 were increased by 29.88%, 20.11%, 16.71%, 18.29%, 26.67%,

收稿日期: 2019-06-25

基金项目: 苏北科技专项 (SZ-YC2017059)

作者简介: 徐达勋 (1969-), 男, 江苏阜宁人, 高级讲师, 主要从事设施蔬菜高效栽培技术研究。(Tel) 15895190118; (E-mail) xundaxu0118@163.com

22.22%, 20.23%, 22.87%, 11.24%, 18.86%, 8.72%, 24.31%, 12.6, 24.65%, 21.78%, 21.80%, 8.68%, 38.40%, 37.63%, 7.67% and 12.41%, respectively. The content of titratable acid was decreased by 19.23%, and there was no significant difference in single fruit weight.

Key words: aerobic drip irrigation; cherry tomato; yield; quality; photosynthesis

近年来,中国设施农业发展极为迅速,为中国果蔬的周年供应提供了保障^[1]。然而,由于生产中常存在过度灌溉、过量施肥、中耕过少及人为践踏频率过高等原因,导致设施土壤容质量逐年增加,土壤通气性逐年降低,植株根系低氧胁迫时有发生,产量和品质显著降低^[2-3]。大量研究表明,根区长期缺氧往往会对植物造成如下几方面的影响:(1)降低植物对水分、养分的吸收能力,降低根系活力,抑制植物生长^[4];(2)抑制植物的有氧呼吸,造成ATP及其他代谢产物减少,同时无氧呼吸产生的乙醇、乙醛等对植物产生毒害作用,影响植物生长发育^[5];(3)降低土壤微生物群落多样性和土壤酶活性,导致土壤养分含量降低和植株病害加重^[6-7];(4)促进气孔关闭,加速叶绿素降解和降低光合酶活性,抑制植物光合作用,降低产量和品质^[8-9];(5)降低土壤氧化还原电位,导致土壤有毒物质和还原性物质的积累^[10]。如何有效缓解植株根区低氧胁迫,已成为当前设施果蔬栽培亟待解决的关键问题之一。

增氧滴灌是近年来兴起的一种新型灌溉技术,将地下滴灌技术和增氧技术有机结合,不仅具有地下滴灌的节水和保持土壤团粒结构的优势,而且可通过增氧技术改善植株根区的缺氧环境,促进植物的生长发育,为充分挖掘作物的生产潜力提供一条新的绿色环保途径^[11]。前人研究表明,增氧滴灌可显著改善土壤通气状况,促进作物根系生长,提升作物光合效率,提高小白菜^[11]、甜瓜^[12]、香芹^[13]、番茄^[14]、草莓^[15]和紫茄^[16]等作物的产量和品质。目前,地下滴灌的增氧方法主要有物理增氧、化学增氧和综合增氧3种方法,然而,关于不同增氧方法对作物产量和品质的影响研究尚不多见,尤其对果菜类蔬菜的影响更是未见相关报道。

因此,本研究以设施樱桃番茄为试验材料,采用物理增氧、化学增氧和综合增氧3种方法进行增氧灌溉,研究不同增氧灌溉方法对设施樱桃番茄根系生长、光合作用、产量、品质及水分利用率的影响,以期获得最佳的增氧滴灌方法,为设施樱桃番茄高效种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

樱桃番茄品种为福特斯(72-152),购自瑞克斯

旺(青岛)农业服务有限公司;物理增氧用微型充气泵(40 L/min),购自上海宝欧机电有限公司;化学增氧用35% H₂O₂溶液,购自荆州双雄化工科技有限公司。试验用日光温室坐北朝南,面积527 m²(62 m×8.5 m),棚膜为醋酸乙烯薄膜。日光温室土壤为黏壤土,pH为7.85,容质量1.31 g/cm³,有机质含量14.82 g/kg,速效氮、磷、钾含量分别为68.2 mg/kg、56.3 mg/kg、132.6 mg/kg,田间持水量25.2%。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于盐城生物工程高等职业技术学校日光温室内实施,采用穴盘进行育苗。2018年3月15日,选取长势、大小一致的幼苗进行移栽,采用小区起垄覆膜双行栽培模式,垄宽、垄高及垄间距分别为50 cm、20 cm和100 cm,株距35 cm,小区长8 m,宽5 m,每个小区定植220株。定植前,在各垄下方预埋直径为18 mm、滴头间距为35 cm的2条地下滴灌带,滴灌带间距40 cm,预埋深度距垄面20 cm。试验共设:常规滴灌(CK),采用正常的灌溉用水;物理增氧滴灌(T1),采用微型充气泵向灌溉用水中加气,加气频率为每隔10 min加气1 min,水气混合体通过预埋滴灌输送至根区;化学增氧滴灌(T2),灌溉前用浓度为35%的过氧化氢溶液5 ml,按1:100(体积比)进行稀释,并用灌溉水定容至5 L进行灌溉。综合增氧滴灌(T3),同时采用物理增氧和化学增氧方式进行增氧,过氧化氢溶液用量为2.5 ml,物理增氧频率为每隔10 min加气0.5 min,各处理4次重复。樱桃番茄整个生育期每隔5 d滴灌1次,灌水量视植株和土壤湿度而定。各处理施肥、灌水量、植株调整及病虫害防治等田间管理措施保持一致。

1.2.2 测定指标及方法 灌溉水溶氧量测定:分别于3月15日、4月15日、5月15日、6月15日、7月15日、8月15日和9月15日滴灌1 h时,采用梅上海三信溶氧仪(SX716)进行各处理灌溉水溶氧量测定。8月10日,取各处理根系进行根系生长指标测定:采用GXY-A型根系分析仪测定总根长、总根表面积、总根体积、平均直径、根尖数;总根干质量测定采用烘干法进行;根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法。光合参数测定:分别于3月20日、5月1日、6月10日、7月20日、8月30日和9月20日上午10:00-

11:00时,选取各处理植株的第3片功能叶,用 Li-6400XT 型便携式光合作仪(美国 LI-COR 公司产品)进行净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及蒸腾速率(T_r)测定。产量及水分利用率测定:按小区统计樱桃番茄产量,同时各小区选 10 株进行结果数、单果质量及单株产量统计;按小区统计整个生育期灌水量,计算水分利用率,水分利用率=产量/灌水量。品质指标测定:可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、 V_c 、番茄红素、可滴定酸及硝酸盐含量分别采用蒽酮比色法、考马斯亮蓝 G-250 法、手持折射仪(RHBO-90)测定法、2,6-二氯酚酚滴定法、高效液相色谱法(HPLC)、标准酸碱滴定法和紫外分光光度法进行测定。

1.2.3 数据分析 采用 Excel 2007 软件进行数据整理、

计算及作图,用 SPSS 18.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同增氧滴灌方法对灌溉水增氧效果的影响

如表 1 所示,不同增氧滴灌方法对灌溉水增氧效果存在明显差异。樱桃番茄不同生长阶段,常规滴灌(CK)的灌溉水最大溶氧量为 8.22 mg/L,平均溶氧量为 8.09 mg/L。与 CK 相比,物理增氧滴灌(T1)、化学增氧滴灌(T2)和综合增氧滴灌(T3)的灌溉水最大溶氧量分别增长 21.17%、40.63%和 41.73%,T1、T2 和 T3 的灌溉水平均溶氧量分别增长 12.68%、28.89%和 29.88%。这说明,增氧滴灌可明显提高灌溉水中的溶氧量,其中,以综合增氧滴灌方法增氧效果最佳。

表 1 不同增氧滴灌方法的灌溉水溶氧量

Table 1 Water-soluble oxygen content in irrigation with different aerobic drip irrigation methods

| 处理 | 溶氧量(mg/L) | | | | | | |
|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3月15日 | 4月15日 | 5月15日 | 6月15日 | 7月15日 | 8月15日 | 9月15日 |
| 常规滴灌(CK) | 8.15 | 8.02 | 7.95 | 8.22 | 8.08 | 8.12 | 8.08 |
| 物理增氧滴灌(T1) | 8.52 | 8.65 | 9.32 | 8.98 | 9.96 | 8.95 | 9.42 |
| 化学增氧滴灌(T2) | 10.02 | 9.86 | 11.56 | 9.41 | 9.95 | 11.22 | 10.96 |
| 综合增氧滴灌(T3) | 9.95 | 9.62 | 11.65 | 9.83 | 9.86 | 11.28 | 11.35 |

2.2 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄根系生长的影响

如表 2 所示,增氧滴灌可显著促进温室樱桃番茄根系生长,根系总根长、总根干质量、总根表面积、总根体积、平均直径、根尖数及根系活力均显著增加。与 CK 相比,T1 处理的温室樱桃番茄根系总根长、总根干质量、总根表面积、总根体积、平均直径、根尖数及根系活力分别显著增加 13.96%、11.60%、14.22%、13.33%、13.89%、11.45%和 12.63% ($P<0.05$),T2 处理分别显著增加 17.12%、10.47%、9.73%、26.67%、16.67%、16.79%和 21.27% ($P<0.05$),T3 处理分别显著增加 20.11%、16.71%、18.29%、26.67%、22.22%、20.23%和 22.87% ($P<0.05$)。

这说明,增氧滴灌可显著促进温室樱桃番茄根系生长和提升根系活力,从而提高植株对水分、养分的汲取能力,其中,以综合增氧滴灌方法效果最佳。

2.3 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄光合参数的影响

如图 1 所示,随着温室樱桃番茄的生长,叶片光

合作用强度呈现先升高后降低的趋势,而增氧滴灌可显著提高不同生长阶段叶片的光合作用效率。7月20日,各处理的樱桃番茄叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)均达到最高,其中,CK 的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别达到 18.36 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、222.00 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、345.15 $\mu\text{L}/\text{L}$ 和 3.11 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。与 CK 相比,T1 处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别提高 6.86%、15.32%、6.84%和 8.68%,差异达到显著水平 ($P<0.05$);T2 处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别提高 10.84%、22.07%、10.15%和 17.68%,差异达到显著水平 ($P<0.05$),且 P_n 、 G_s 和 T_r 较 T1 处理差异达到显著水平 ($P<0.05$);T3 处理的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 分别提高 11.24%、18.86%、8.72%和 24.31%,均较 CK 和 T1 处理差异达到显著水平 ($P<0.05$)。这说明,增氧滴灌可显著提升温室樱桃番茄叶片的光合作用,其中,以综合增氧滴灌方法效果最佳,这与增氧滴灌促进樱桃番茄根系生长和叶片气孔开放密切相关。

表 2 不同增氧滴灌方法的温室樱桃番茄根系生长情况

Table 2 Root growth of cherry tomato in greenhouse with different aerobic drip irrigation methods

| 处理 | 总根长 (cm) | 总根干质量 (g) | 总根表面积 (cm ²) | 总根体积 (cm ³) | 平均直径 (cm) | 根尖数 | 根系活力 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$] |
|------------|-------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|-------|---|
| 常规滴灌(CK) | 52.35a | 8.02a | 9.35a | 0.15a | 0.36a | 262a | 188.56a |
| 物理增氧滴灌(T1) | 59.66b | 8.95b | 10.68bc | 0.17b | 0.41b | 292b | 212.38b |
| 化学增氧滴灌(T2) | 61.31c | 8.86b | 10.26b | 0.19b | 0.42bc | 306bc | 228.66bc |
| 综合增氧滴灌(T3) | 62.88c | 9.36c | 11.06c | 0.19b | 0.44c | 315c | 231.69c |

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

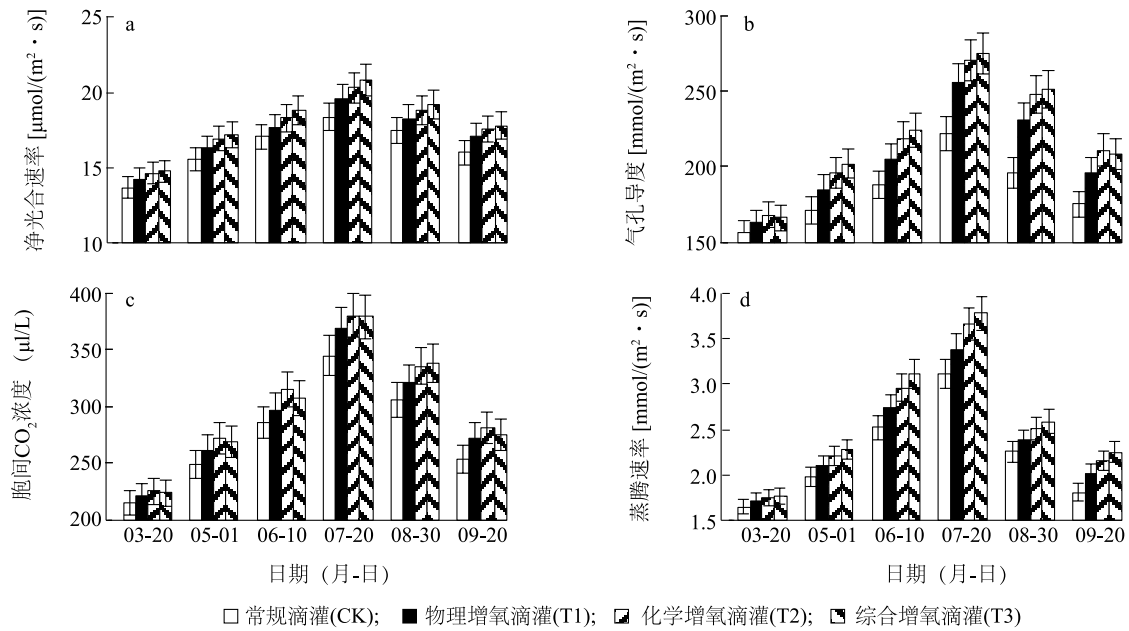


图 1 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄光合作用的影响

Fig.1 Effects of different aerobic drip irrigation methods on photosynthesis of cherry tomato in greenhouse

2.4 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄产量及水分利用率的影响

如表 3 所示,不同增氧滴灌方法可显著提高温室樱桃番茄单株结果数、单株产量、667 m²产量和水分利用率。与 CK 相比,T1 处理的单果质量无显著差异,而单株结果数、单株产量、667 m²产量和水分利用率分别提高 8.1 个、16.90%、15.35% 和 15.34%,差异均达到显著水平($P<0.05$);T2 处理的单果质量无显著差异,而单株结果数、单株产量、667 m²产量和水分利用率分别提高 11.8 个、23.24%、20.40%和 20.40%,差异均达到显著水平($P<0.05$);T3 处理的单果质量无显著差异,而单株结果数、单株产量、667 m²产量和水分利用率分别提高 12.6 个、24.65%、21.78%和 21.80%,差异均达到显著水平($P<0.05$),且单株结果数、单株产量和

667 m²产量较 T1 处理差异均达到显著水平($P<0.05$)。这说明,增氧滴灌可显著提高温室樱桃番茄产量和水分利用率,其中,以综合增氧滴灌方法效果最佳,这与综合增氧滴灌提高樱桃番茄叶片光合作用和促进根系生长密切相关。

2.5 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄品质的影响

如表 4 所示,不同增氧滴灌方法可显著提高温室樱桃番茄品质。与 CK 相比,T1 处理的可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、V_c、番茄红素含量分别提高 6.31%、34.40%、27.59%、4.43% 和 12.27%,可滴定酸含量降低 11.54%,差异均达到显著水平($P<0.05$);T2 处理的可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、V_c、番茄红素含量分别提高 8.27%、40.00%、35.93%、6.07%和 12.52%,可滴定

酸含量降低 15.38%, 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); T3 处理的可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、 V_c 、番茄红素含量分别提高 8.68%、38.40%、37.63%、7.67% 和 12.41%, 可滴定酸含量降低 19.23%, 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。这

说明, 增氧滴灌可显著提高温室樱桃番茄品质, 其中, 以综合增氧滴灌方法效果最佳, 这与增氧滴灌提高樱桃番茄叶片光合作用和促进根系对水分、养分的吸收密切相关。

表 3 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄产量及水分利用率的影响

Table 3 Effects of different aerobic drip irrigation methods on yield and water use efficiency of cherry tomato in greenhouse

| 处理 | 单果质量(g) | 单株果数 | 单株产量(kg) | 折合 667 m ² 产量(kg) | 水分利用率(kg/m ³) |
|------------|---------|-------|----------|------------------------------|---------------------------|
| 常规滴灌(CK) | 20.85a | 70.5a | 1.42a | 2513.89a | 31.42a |
| 物理增氧滴灌(T1) | 20.91a | 78.6b | 1.66b | 2899.82b | 36.24b |
| 化学增氧滴灌(T2) | 20.88a | 82.3c | 1.75c | 3026.75c | 37.83b |
| 综合增氧滴灌(T3) | 20.94a | 83.1c | 1.77c | 3061.35c | 38.27b |

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 不同增氧滴灌方法对温室樱桃番茄品质的影响

Table 4 Effects of different aerobic drip irrigation methods on quality of cherry tomato in greenhouse

| 处理 | 可溶性糖含量 (mg/g) | 可溶性蛋白质 含量(mg/g) | 可溶性固形物 含量(mg/g) | V_c 含量 (mg/kg) | 番茄红素含量 (mg/kg) | 可滴定酸含量 (%) | 硝酸盐含量 (mg/kg) |
|------------|------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------|------------------|
| 常规滴灌(CK) | 46.42a | 1.25a | 90.36a | 116.58a | 36.75a | 0.52a | 65.85a |
| 物理增氧滴灌(T1) | 49.35b | 1.68b | 115.29b | 121.75b | 41.26b | 0.46b | 74.36b |
| 化学增氧滴灌(T2) | 50.26b | 1.75b | 122.83b | 123.66b | 41.35b | 0.44b | 77.85b |
| 综合增氧滴灌(T3) | 50.45b | 1.73b | 124.36b | 125.52b | 41.31b | 0.42b | 78.25b |

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

根系是植物生长发育的基础。根区低氧胁迫下, 植物有氧呼吸受到抑制, 对水分和养分的吸收能力显著降低, 无氧呼吸产生的乙醇、乙醛等代谢产物进一步对根系造成毒害^[4-5]。前人研究结果表明, 增氧滴灌可提高灌溉水的溶氧量, 改善根系生长环境, 有助于根系进行有氧呼吸, 显著促进植物根系的生长发育, 提升根系对水分和养分的吸收能力^[16-17]。本研究结果表明, 增氧滴灌可显著促进温室樱桃番茄根系生长, 提升根系活力, 其中, 以综合增氧滴灌方法效果最佳, 根系总根长、总根干质量、总根表面积、总根体积、平均直径、根尖数及根系活力分别较常规滴灌(CK)显著增加 20.11%、16.71%、18.29%、26.67%、22.22%、20.23% 和 22.87% ($P < 0.05$)。本结果与前人研究结果较为一致, 其原因主要是: 首先, 根区增氧提高了植物根系的有氧呼吸, 促进了根系对水分、养分的主动吸收能力, 同时降低了无氧呼吸代谢产物对植物根系的伤害, 从而促进了植物根系的生长^[16-17]; 其次, 根区增氧提高

了根区土壤微生物数量及多样性, 加速分解土壤有机质, 提高土壤肥力, 促进根系生长^[18]; 第三, 综合增氧方法的灌溉水溶氧量明显高于物理增氧(T1)和化学增氧(T2), 因此, 根系生长发育情况显著优于 T1 和 T2 处理。

植物根系生长发育与叶片光合作用、干物质积累等密切相关^[19]。根区低氧胁迫下, 根系生长发育受抑制, 植物净光合速率明显降低, 作物产量显著下降。前人研究结果表明, 增氧滴灌可显著促进植物根系的生长发育, 提升根系对水分和养分的吸收能力, 提升光合作用效率, 增加作物产量^[14, 20]。本研究结果表明, 增氧滴灌可显著提升温室樱桃番茄叶片的光合作用, 其中, 以综合增氧滴灌方法效果最佳, 净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均较对照显著增加。本结果与前人研究结果较为一致, 其原因主要是根区增氧显著降低了植株体内的 ABA 含量, 从而促使叶片气孔打开, 提升净光合效率^[14]。增氧滴灌可显著缓解根区的低氧胁迫, 提高温室樱桃番茄的产量和水分利用率, 以综合增氧滴灌方法效果最佳。其中, 单株结果数增加是产量增加的主要因素, 单株

结果数较对照显著增加 12.6 个,而不同处理的单果质量则未达到显著差异。本研究结果与前人的根区增氧可提高作物产量和水分利用率结论一致,其原因主要是:首先,根区增氧提高了植物的净光合速率,光合产物增加,减少了因光合效率低而导致的落花落果,提高了结果数^[21];其次,根区增氧提高了植株对水分、养分的吸收能力,减少了养分不足导致的落花落果,提高了结果数^[22]。

根区增氧可改善植株根际土壤环境,有助于植株进行正常的生理代谢,对提高果蔬产品品质具有一定的促进作用^[12]。本研究结果表明,增氧滴灌可显著提升温室樱桃番茄的果实品质,其中,以综合增氧滴灌方法效果最佳,可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、V_c及番茄红素含量分别较对照提高 8.68%、38.40%、37.63%、7.67%和 12.41%,可滴定酸含量降低 19.23%,这可能与增氧滴灌增加了植株光合产物有关。硝酸盐含量是衡量果蔬品质的重要指标之一,含量过高对人体有害^[13]。本研究发现,增氧滴灌显著提高了温室樱桃番茄的硝酸盐含量,其中,以综合增氧滴灌方法提升幅度最大,硝酸盐含量较对照提高 18.83%,但其含量仍远低于安全上限(438 mg/kg)。这说明,增氧滴灌有助于提升樱桃番茄对硝态氮的吸收能力,从而提高产量,但为了避免硝酸盐含量过高而造成品质下降,在日常栽培时应适当减少氮肥用量。

参考文献:

- [1] 彭 澎,梁 龙,李海龙,等. 我国设施农业现状、问题与发展建议[J].北方园艺,2019(5):161-168.
- [2] 马艳春,姚玉新,杜远鹏,等. 葡萄设施栽培不同种植年限土壤理化性质的变化[J].果树学报,2015,32(2):225-231.
- [3] 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):297-307.
- [4] 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.
- [5] 周 勃,郁 敏,米银法. 根际低氧对不同抗性牡丹植株呼吸代谢的影响[J].河南农业大学学报,2016,50(6):734-738,747.
- [6] 柴锦隆,徐长林,张建文,等. 高寒草甸土壤物理特性和微生物数量对模拟践踏的响应[J].草地学报,2016,24(6):1234-1240.
- [7] 何宛晨,卢广林,赵 权,等. 不同年限对栽参土壤生物活性的影响[J].基因组学与应用生物学,2019,38(3):1256-1260.
- [8] 尚春雨,严逸男,陈 露,等. 根际氧环境对水培尖叶莴苣生长生理和品质的影响[J].西北植物学报,2018,38(10):1895-1904.
- [9] 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.
- [10] 郑小兰,王瑞娇,赵群法,等. 根际氧含量影响植物生长的生理生态机制研究进展[J].植物生态学报,2017,41(7):805-814.
- [11] 雷宏军,杨宏光,冯 凯,等. 循环曝气灌溉条件下小白菜生长及水分与养分利用[J].灌溉排水学报,2017,36(11):13-18.
- [12] 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.
- [13] 马筱建,孙景生,刘 浩,等. 不同方式加气灌溉对温室芹菜生长及产量的影响研究[J].灌溉排水学报,2018,37(4):29-33.
- [14] 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.
- [15] 雷宏军,冯 凯,张振华,等. 河南 3 种典型土壤曝气滴灌草莓生长与品质[J].排灌机械工程学报,2017,35(2):158-164.
- [16] 雷宏军,金翠翠,胡世国,等. 增氧地下滴灌对温室紫茄土壤通气性的影响[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(3):325-331.
- [17] 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.
- [18] 易晓华,何 华,金 静,等. 土壤水分和膜下增氧对番茄根际土壤微生物量的影响[J].北方园艺,2015(21):172-177.
- [19] 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.
- [20] 乔建磊,张 冲,徐 佳,等. 加气滴灌对日光温室蓝莓叶绿素荧光特性的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):14-19.
- [21] 郭凯斌,李 升,乔 光. 大樱桃生理落花落果特性及调控机制研究进展[J].种子,2018,37(10):51-56.
- [22] 薛玉梅,穆 欣,许 明. 保护地番茄生理性落花落果的原因及预防措施[J].北方园艺,2007(8):82-83.

(责任编辑:张震林)