

水气互作对辣椒根系形态、产量和品质的影响效应

雷宏军 金翠翠 潘红卫 肖哲元 孙克平
(华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046)

摘要: 为揭示水气互作对辣椒根系形态、产量和品质的影响效应,设置地下水灌溉 C(溶解氧质量浓度 5 mg/L)作为对照,2 个加气量:A(溶解氧质量浓度 15 mg/L)和 O(溶解氧质量浓度 40 mg/L),2 个灌水量:W1 和 W2(0.8 倍和 1.0 倍作物-蒸发皿系数)开展随机区组试验,基于相关性分析和主成分分析对不同处理进行综合评价。结果表明,加气灌溉对辣椒根系形态、产量、品质、株高和氮素利用效率均有明显的促进作用。处理 AW1 产量最高,为 6.78 t/hm²,较处理 OW1 和 CW1 产量分别增加 39.04% 和 42.89%,较处理 AW2 产量增加 30.80% ($P<0.05$)。与处理 CW1 相比,处理 AW1 的可溶性糖含量(BRIX)、可溶性蛋白含量和糖酸比(SAT)分别增加 29.49%、75.24% 和 68.10% ($P<0.05$),处理 AW1 根干质量、总根长、根体积和根表面积分别增加 13.63%、11.09%、59.47% 和 61.67% ($P<0.05$)。与处理 CW2 相比,AW2 辣椒株高、氮素吸收量、产量和灌溉水利用效率分别增加 17.88%、66.56%、26.28% 和 26.12% ($P<0.05$)。根系形态指标(根干质量、总根长、根体积和根表面积)与氮素吸收量、株高、产量、BRIX 含量和可溶性蛋白含量均呈显著正相关,且处理 AW1 综合得分最高。综上,综合考虑提质、增产、节水 3 方面,确定加气量 15 mg/L、灌水量 0.8 倍作物-蒸发皿系数为最佳水气调控模式。

关键词: 辣椒; 加气灌溉; 根系形态; 产量; 品质; 主成分分析

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0344-09 OSID: 

Integrative Effects of Irrigation and Aeration on Root Morphology, Yield and Quality of Pepper

LEI Hongjun JIN Cuicui PAN Hongwei XIAO Zheyuan SUN Keping
(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to unravel the relationship between the root morphology, yield and quality of pepper under different aeration amounts and irrigation amounts, with groundwater of 5 mg/L dissolved oxygen concentration in water (C) as controls, and two aeration rates of dissolved oxygen concentration at 15 mg/L (A) and dissolved oxygen concentration at 40 mg/L (O), and two irrigation amounts of 0.8 times of crop-pan coefficient (W1) and 1.0 times crop-pan coefficient (W2) were set up by randomized block experiments. And correlation analysis and principal component analysis were coupled and used to analyze the optimal irrigation mode. Results showed that aerated irrigation significantly promoted pepper root morphology, yield, quality, plant height and nitrogen use efficiency. The yield of treatment AW1 was the highest at 6.78 t/hm², the yield of treatment AW1 was increased by 39.04% and 42.89% compared with that of OW1 and CW1 treatments, and the yield of treatment AW1 was increased by 30.80% compared with that of AW2 treatment ($P<0.05$). Compared with CW1, the soluble sugar content (BRIX), soluble protein content and sugar-acid ratio (SAT) of AW1 were increased by 29.49%, 75.24% and 68.10% ($P<0.05$), respectively, and the root dry weight, total root length, root volume and root surface area of AW1 were increased by 13.63%, 11.09%, 59.47% and 61.67% ($P<0.05$), respectively. At the same time, compared with the CW2 treatment, the height, nitrogen uptake, yield and irrigation water use efficiency of AW2 pepper plants were increased by 17.88%, 66.56%, 26.28% and 26.12% ($P<0.05$), respectively. Root morphology index, including root dry

weight, total root length, root volume and root surface area, was significantly positively correlated with nitrogen uptake, plant height, yield, BRIX content, and soluble proteins content, and the comprehensive score of AW1 treatment were ranked first. In summary, from the aspects of quality improvement, yield increase and water saving, the treatment at the aeration rate of 15 mg/L and the irrigation rate of 0.8 times the crop-pan coefficient was the best irrigation mode.

Key words: pepper; aerated irrigation; root morphology; yield; quality; principal component analysis

0 引言

根系作为植株吸收水分和养分的主要器官,在植物生长发育中起着重要作用^[1]。膜下滴灌作为温室作物主要的节水灌水方式,具有良好的节水效果,但在滴头附近易于形成持续的饱和湿润锋^[2-3]导致根区缺氧^[4],由于作物根系优先生长在滴头附近^[5],同时根系的生长对土壤氧气胁迫非常敏感,这将导致植物能量供应不足,进而制约根系对水分和养分的吸收,最终限制作物生长^[6-7]。地膜覆盖阻碍了土壤 CO₂ 排放,破坏了土壤 O₂ 补充和扩散的动态平衡系统^[8],进一步加剧作物根区缺氧现象,影响地上部生长^[9]。为缓解这一问题,通过加气灌溉技术将水肥气混合气泡输送到根区土壤,改善覆膜滴灌根区土壤通气性^[3,10],进而激发作物品质和产量提升潜力^[11]。根区加气有利于改善作物根区气体环境,使番茄根系活力和吸收能力增强^[12]。加气灌溉刺激了根系伸长,根系的生长保障了冠层的扩张,光拦截效率和光合效率提高^[13],产量增加^[14]。

近年来,加气灌溉对温室作物影响研究不再局限于作物的生长生理指标,而是将产量和品质作为重点来研究^[14-15]。根系作为作物养分摄入的主要通道,也是作物健康生长的保证,却鲜有将根系形态用于评价加气灌溉的综合效果。本试验基于温室辣椒产量、灌溉水利用效率(Irrigation water use efficiency, IWUE)、果实品质及根系形态共 11 个指标对加气灌溉进行综合评价,得出加气灌溉下根系形态与产量、品质及灌溉水利用效率之间的关系,以及温室辣椒最优的加气灌溉参数,为加气灌溉在设施蔬菜的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在河南省郑州市华北水利水电大学农业高效用水试验场现代化温室进行(34°47'23"N, 113°47'41"E)。试验温室建筑总面积为 537.6 m²,开间为 4 m,跨度为 9.6 m。温室内南、北面分别装有风机和湿帘,用于调节温室内的温度和空气湿度。供试土壤类型为黏壤土,土壤容重 1.25 g/cm³,田间

质量持水率为 23.4%。土壤基础养分状况为:碱解氮质量比 38.87 mg/kg,速效钾质量比 3.42 mg/kg,速效磷质量比 9.98 mg/kg,有机质质量比 21.54 g/kg,pH 值 7.12。图 1 为辣椒生育期内温湿度变化。

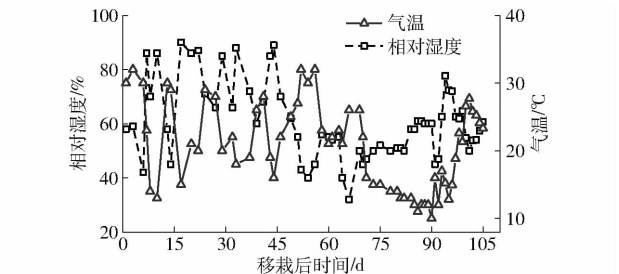


图 1 温室辣椒生育期相对湿度和平均气温变化曲线
Fig. 1 Variation curves of relative humidity and average temperature in greenhouse pepper growth period

1.2 试验设计

种植作物为辣椒,品种为“豫艺鲜辣 8 号”,选取 8~10 叶龄、长势一致的辣椒幼苗进行移栽,2019 年 9 月 11 日定植,定植时浇透底水,定植后 12 d 覆聚乙 烯膜,种植桶为圆柱形,直径 30 cm,高 40 cm,种植桶之间相互挨连,植株间距 30 cm,桶行距为 70 cm,每 10 个种植桶为一行,采用全埋式布设,以模拟田间作物生长的光照和温度。采用地下滴灌的方式进行灌溉,滴头型号为 Netafim(以色列奈特菲姆灌溉公司),滴头埋深 10 cm(滴头与根系的空间示意图如图 2 所示),额定流量 2.5 L/h。

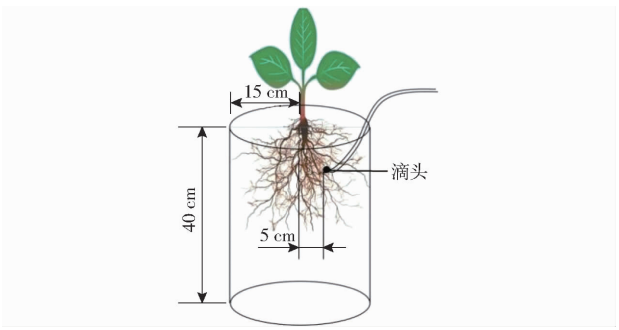


图 2 根系与滴头空间示意图
Fig. 2 Schematic of root system and dripper space

本试验设计 2 个加气量(溶解氧质量浓度分别为 15、40 mg/L),设置常规地下水灌溉(溶解氧质量浓度为 5 mg/L)作为对照处理^[16],2 个灌水量(0.8 倍和 1.0 倍作物-蒸发皿系数)随机区组试验,

共计 6 个处理。试验设计如表 1 所示。

表 1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理	溶解氧质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	施氮量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌水量
CW1	5	300	0.8 <i>E</i>
CW2	5	300	1.0 <i>E</i>
AW1	15	300	0.8 <i>E</i>
AW2	15	300	1.0 <i>E</i>
OW1	40	300	0.8 <i>E</i>
OW2	40	300	1.0 <i>E</i>

注:C、A、O 分别表示溶解氧质量浓度为 5、15、40 mg/L 处理, W1、W2 分别表示 0.8 倍和 1.0 倍作物-蒸发皿系数,对应于低水量和高水量处理,*E* 为 Φ 601 蒸发皿水面蒸发量。

分别采用文丘里空气射流器(Mazzei air injector 684, Mazzei Corp 公司,美国)和海蓝科技微纳米气泡机(50 Hz,宜兴市海蓝科技有限公司)制备溶解氧质量浓度 15 mg/L 和 40 mg/L 的加气量。文丘里空气射流器利用储水管路、循环水泵、文丘里空气射流器等设备通过压力差吸附空气进行曝气,待灌溉水中溶解氧质量浓度达到 15 mg/L 开始灌溉。海蓝科技微纳米气泡机利用变压吸附分离原理制备纯氧,通过外置的储水罐进行循环,可制备超高溶解氧微纳米气泡水。于循环曝气出水端接入供水干管,接入压力表和供水水表,待灌溉水中溶解氧质量浓度达到 40 mg/L 开始灌溉。常规地下水灌溉处理利用首部供水装置进行供水,地下水中溶解氧质量浓度为 5 mg/L 左右。首部供水压力均由首部压力表控制为 0.10 MPa。试验中灌水下限根据距离植株径向 5 cm 埋深处的张力计确定(12 型分体式张力计,中国农业科学院农田灌溉研究所)^[17]。土壤基质势下限控制为(−30±5)kPa,按埋深 20 cm 处的土壤湿度监测结果确定^[18]。灌水量计算式为^[19]

$$W=0.1AE_pK_p$$

(1)

式中 W ——每次灌水量,L
 A ——种植桶面积, m^2
 E_p ——2 次灌水间隔蒸发皿的蒸发量,mm
 K_p ——作物-蒸发皿系数,W1 时取 0.8、W2 时取 1.0

其中 0.1 为单位换算系数。灌溉时间及灌溉水量见表 2。

试验中肥料采用水肥气一体化的方式施入,本试验所用肥料分别为尿素(N 含量大于等于 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 ,P 含量大于等于 16%)和水溶性硫酸钾(K_2O 含量大于等于 52%)。其中磷肥和钾肥全部基施,且施入量相同。氮肥的施入采用全生育期分施的方式,分别于移植后 24、37、44、53、63、72、

表 2 生育期内灌水量

Tab.2 Irrigation volume during crop growing season

灌溉时间	移栽后时 间/d	灌水量/mm	
		W1	W2
2019 年 9 月 27 日	17	10.88	13.60
2019 年 10 月 4 日	24	10.24	12.80
2019 年 10 月 10 日	30	9.92	12.40
2019 年 10 月 17 日	37	8.88	11.10
2019 年 10 月 24 日	44	9.76	12.20
2019 年 11 月 2 日	53	10.56	13.20
2019 年 11 月 12 日	63	8.48	10.60
2019 年 11 月 21 日	72	8.96	11.20
2019 年 11 月 27 日	78	8.40	10.50
2019 年 12 月 4 日	85	6.88	8.60
2019 年 12 月 11 日	92	5.76	7.20
2019 年 12 月 20 日	101	7.36	9.20
合计		106.08	132.60

85 d 进行 7 次施氮处理,施氮的比例为 2:3:2:2:3:2:1,施氮量为 300 kg/hm^2 。辣椒全生育期共 107 d,生育期划分见表 3。

表 3 辣椒生育期

Tab.3 Pepper growth period

生育期	开始时间	结束时间	移栽后 时间/d
苗期	2019 年 9 月 11 日	2019 年 9 月 28 日	1~18
开花坐果期	2019 年 9 月 29 日	2019 年 10 月 30 日	19~52
果实膨大期	2019 年 10 月 31 日	2019 年 11 月 30 日	53~81
成熟期	2019 年 12 月 1 日	2019 年 12 月 26 日	82~107

1.3 试验取样及测定方法

1.3.1 根系指标测定

生育期结束后以辣椒茎秆为中心,尽可能完整地取出根系,装入网格直径为 0.5 mm 的网袋,在实验室用水浸泡后,用水冲洗使土壤与根分离。根系洗净后,用吸水纸吸干根系表面水分,称取鲜质量后使用扫描仪(Epson Expression 1600 pro 型)将根系扫描成灰阶 TIF 图,扫描时为了使根系的分枝不互相缠绕,将辣椒根系整理好放入透明的托盘内。将获取的 TIF 图用 WinRHIZO Pro 图像处理系统分析,获取根系有效根表面积(cm^2)、有效根体积(cm^3)、根长(cm)等指标。

1.3.2 品质指标测定

收获时进行果实样品采集,每个处理随机选取 3 株植株,并编号标记。每株选取成熟度一致的 3 颗果实混合打成匀浆用于品质测定。果实的可溶性固形物(可溶性糖(BRIX)和有机酸(ACID))含量用手持测糖仪(PAL-1 型,爱拓公司,日本)测定,可溶性蛋白含量用 Brandford 法测定。

糖酸比 (Sugar-acid ratio, SAT) 计算式为

$$SAT = BRIX / ACID \tag{2}$$

式中 *BRIX*——辣椒可溶性糖含量, %
ACID——辣椒有机酸含量, %

1.3.3 辣椒株高、产量和 IWUE

每个处理分别选择 3 株长势均匀的植株利用卷尺每 10 d 测其株高。选用精度 0.01 g 电子天平称量,以株为单位统计果实数量,生育期末结束采摘后累计单株全生育期产量。其中灌溉水利用效率 (IWUE) 计算公式为

$$IWUE = 10Y / I \tag{3}$$

式中 *IWUE*——灌溉水利用效率, kg/m³
Y——单株产量, kg/hm²
I——辣椒整个生育期内单株总灌水量, mm

1.3.4 辣椒氮素吸收量

生育期结束后,选取长势均匀的 3 株辣椒,将根、茎、叶、果分开,于干燥箱 105℃ 杀青 30 min,然后将干燥箱调至 75℃ 干燥至质量恒定,样品再由粉碎机粉碎后过 0.25 mm 筛,利用凯氏定氮仪 (K9840 型,海能未来技术集团股份有限公司) 测定植株全氮含量。

1.3.5 统计分析

利用 Excel 2013 对试验数据进行分析,SPSS 22.0 进行交互作用方差分析和主成分分析,利用 SPSS 22.0 的邓肯新复极差法进行显著性检验, Pearson 法进行相关分析 ($P < 0.05$),使用 Origin Pro 2022 和 AutoCAD 2007 绘图。

2 结果与分析

2.1 加气灌溉对辣椒根系形态的影响

图 3 为各处理根系 TIF 图,从图中可以看出,加气灌溉对根系形态影响显著,根系较发达,具有较高的根密度,增加了根系与土壤的接触点,有利于从土壤中吸收水分和养分。与对照相比,侧根数、根体积、根表面积、根分叉数都显著增大。且灌水量和加气量均对辣椒根系形态有显著性影响 (图 3、表 4),灌水量 W1 处理均显著高于灌水量 W2 处理,处理 AW1 比 AW2 根干质量、总根长、根体积和根表面积分别增加 12.23%、11.60%、21.22% 和 16.64% ($P < 0.05$),因此适度减少灌水量有助于根系的生长。处理 AW1 较处理 CW1、OW1 根干质量分别增加 13.63%、8.16%,处理 AW2 较 CW2、OW2 分别增加 10.16%、8.17% ($P < 0.05$);处理 AW2、OW2 较处理 CW2 辣椒总根长分别增加 26.22%、14.19%,AW1 较 OW1 增加 11.09% ($P < 0.05$),说明根系生长不会随着加气量的增加而一直增加;

AW1、OW1 较 CW1 辣椒根体积分别显著增加 59.47%、62.67%,AW2 较 CW2、OW2 分别增加 82.87%、27.37% ($P < 0.05$);AW2、OW2 较 CW2 根表面积分别显著增加 51.57%、16.56%,AW2 较 OW2 显著增加 30.03%,AW1 较 CW1、OW1 分别显著增加 61.67%、53.19% ($P < 0.05$);处理 AW2、OW2 比处理 CW2 根冠比分别显著降低 64.37%、37.02%,AW2 较 OW2 显著降低 37.02%,AW1 较 CW1、OW1 分别显著降低 15.37%、17.41% ($P < 0.05$)。

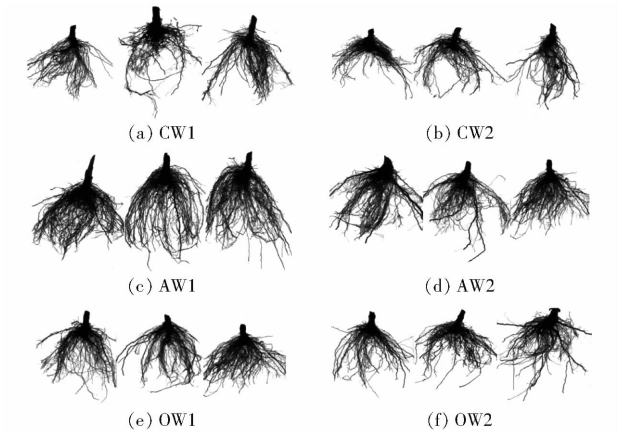


图 3 不同加气量处理根系 TIF 图
Fig. 3 TIF diagram of roots under different aeration treatments

由交互作用分析可知 (表 4),单因素下,加气量与根干质量、根体积、根表面积和根冠比均极显著正相关 ($P < 0.01$),灌水量与根干质量、总根长、根体积和根冠比极显著正相关 ($P < 0.01$);两因素交互下,加气量和灌水量对根冠比有极显著影响 ($P < 0.01$),对总根长、根体积均有显著影响 ($P < 0.05$)。综上,灌水量 W1、溶解氧质量浓度 A 的组合处理对辣椒根系生长具有显著促进作用。

2.2 加气灌溉对株高的影响

加气灌溉各处理辣椒株高动态变化如图 4 所示。分析发现,辣椒株高随定植时间的增加而增加,到成熟期增长缓慢趋于平缓。生育期内处理 CW1、AW1、OW1 和 CW2、AW2、OW2 的株高均值分别为 38.45、43.44、42.29 cm 和 37.08、41.46、40.52 cm。移栽后第 65 天,加气低水处理与对照相比,辣椒株高差异最显著,W1 水平下处理 AW1 和 OW1 的株高较 CW1 增加 16.72% 和 15.10%;移栽后第 75 天,加气高水处理较对照处理辣椒株高差异最显著,W2 水平下处理 AW2 和 OW2 的株高较 CW2 增加 17.88% 和 15.85% ($P < 0.05$)。本研究中,不同灌水量对辣椒株高在定植后 35 ~ 85 d 差异最显著 ($P < 0.05$),因为此时期正处于辣椒开花坐果期和果实膨大期,属于营养生长期,加气灌溉通过提高

表 4 不同加气灌溉处理辣椒根系指标

Tab.4 Root indexes of different aerated irrigation treatments

处理	根干质量/g	总根长/cm	根体积/cm ³	根表面积/cm ²	根冠比
CW1	(10.42 ± 0.41) ^{bc}	(2 061.07 ± 66.16) ^b	(28.16 ± 5.63) ^c	(639.21 ± 58.63) ^{cd}	(0.22 ± 0.110) ^c
CW2	(9.58 ± 0.31) ^c	(1 814.11 ± 28.72) ^c	(24.55 ± 1.09) ^c	(584.52 ± 15.92) ^d	(0.42 ± 0.018) ^a
AW1	(11.84 ± 0.39) ^a	(2 289.74 ± 72.50) ^a	(44.90 ± 2.12) ^a	(1 033.39 ± 39.59) ^a	(0.19 ± 0.006) ^d
AW2	(10.55 ± 0.58) ^b	(2 051.74 ± 61.27) ^b	(37.04 ± 4.19) ^b	(885.95 ± 10.11) ^b	(0.15 ± 0.011) ^c
OW1	(10.95 ± 0.20) ^b	(2 171.66 ± 176.42) ^{ab}	(45.80 ± 5.26) ^a	(674.56 ± 57.43) ^{cd}	(0.23 ± 0.003) ^c
OW2	(9.75 ± 0.21) ^{cd}	(2 071.52 ± 70.90) ^b	(29.08 ± 4.27) ^c	(681.32 ± 88.54) ^c	(0.26 ± 0.006) ^b
I	16.30 **	5.71 *	20.78 **	74.45 **	321.09 **
F W	39.73 **	20.39 **	23.65 **	6.94 *	169.04 **
I × W	0.60	6.30 *	4.00 *	3.29	200.97 **

注:I表示加气量,W表示灌水量。同列数据后不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平存在显著性差异,* 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平存在显著性差异,下同。

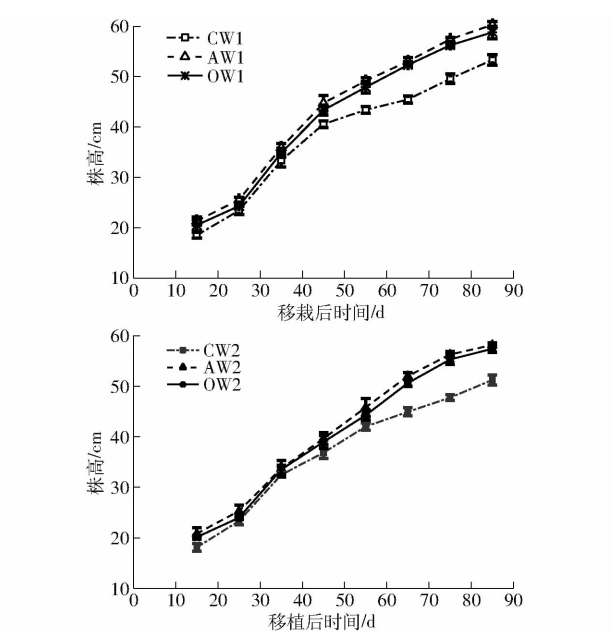


图 4 加气灌溉各处理辣椒株高动态变化曲线

Fig.4 Dynamic change curves of pepper plant height in each treatment with aerated irrigation

根系的呼吸和代谢,增强了根系对水分及养分的吸收能力,满足了地上部对营养物质的需求,促进了株高的生长,故差异性显著。

2.3 加气灌溉对辣椒产量、水分利用效率和辣椒品质的影响

加气灌溉显著提高辣椒产量(表 5)。随着加气量的增加,产量呈现先增加后减小的趋势,W1 水平下,处理 AW1 产量最高,为 6.78 t/hm²。处理 AW1 产量较 OW1 和 CW1 增大 39.04% 和 42.89%。处理 AW1 产量较 AW2 增加 30.80% ($P < 0.05$)。与 CW1 和 OW1 相比,处理 AW1 的灌溉水利用效率分别提高 42.89% 和 39.04%,处理 AW1 较 AW2 灌溉水利用效率提高 63.63%。

处理 AW1 的 BRIX、可溶性蛋白含量及 SAT 均最大,CW2 处理的 ACID 含量最大。随加气量增加,处理 AW1 的 BRIX 含量较 OW1 和 CW1 分别增大 20.24% 和 29.49% ($P < 0.05$),随着灌水量的增加,辣椒 BRIX 和可溶性蛋白含量均有所降低,ACID 含量有所增加。处理 AW1 较 OW1 和 CW1 的 ACID 含量分别降低 35.15% 和 22.50%,处理 AW1 的 ACID 含量较 AW2 降低 17.11% ($P < 0.05$);处理 AW1 和 OW1 可溶性蛋白含量较 CW1 分别增大 75.24% 和 62.03%,处理 AW1 可溶性蛋白含量较 AW2 增大 26.44% ($P < 0.05$)。处理 AW1 SAT 较

表 5 不同加气灌溉处理辣椒产量、水分利用效率和辣椒品质

Tab.5 Different aerated irrigation treatments for pepper yield, water use efficiency and pepper quality

处理	产量/(t·hm ⁻²)	IWUE/(kg·m ⁻³)	BRIX 含量/%	ACID 含量/%	可溶性蛋白含量/(g·kg ⁻¹)	SAT/%
CW1	(4.75 ± 0.06) ^c	(45.01 ± 0.62) ^b	(2.60 ± 0.100) ^c	(0.67 ± 0.021) ^b	(9.26 ± 0.41) ^c	(3.90 ± 0.05) ^{cd}
CW2	(4.11 ± 0.21) ^d	(31.16 ± 1.58) ^d	(2.23 ± 0.058) ^d	(0.81 ± 0.066) ^a	(8.75 ± 0.20) ^c	(2.77 ± 0.24) ^d
AW1	(6.78 ± 0.07) ^a	(64.31 ± 0.68) ^a	(3.37 ± 0.058) ^a	(0.52 ± 0.045) ^c	(16.40 ± 1.41) ^a	(6.56 ± 0.67) ^a
AW2	(5.19 ± 0.13) ^b	(39.30 ± 1.01) ^c	(3.13 ± 0.153) ^b	(0.62 ± 0.021) ^b	(12.97 ± 0.14) ^b	(5.03 ± 0.12) ^{bc}
OW1	(4.88 ± 0.02) ^c	(46.25 ± 0.23) ^b	(2.80 ± 0.200) ^d	(0.80 ± 0.031) ^c	(15.17 ± 1.13) ^a	(3.52 ± 0.33) ^d
OW2	(4.13 ± 0.13) ^d	(31.32 ± 0.95) ^d	(2.37 ± 0.058) ^d	(0.45 ± 0.110) ^c	(11.94 ± 0.50) ^b	(5.50 ± 1.48) ^{ab}
I	316.43 **	402.13 **	84.00 **	13.17 **	85.06 **	19.20 **
F W	304.27 **	1 623.07 **	38.44 **	1.39	42.16 **	0.49
I × W	28.52 **	63.78 **	1.12	33.14 **	5.96 *	11.74 **

OW1 和 CW1 分别增大 86.21% 和 68.10%，处理 AW1 SAT 较 AW2 增大 30.43% ($P < 0.05$)。

由交互作用分析可知,单因素下,加气量与产量、IWUE、BRIX 含量、ACID 含量、可溶性蛋白含量和 SAT 均极显著正相关($P < 0.01$),灌水量与产量、IWUE、BRIX 含量和可溶性蛋白含量极显著正相关($P < 0.01$);两因素互作下,加气量和灌水量对产量、IWUE、ACID 含量和 SAT 影响极显著($P < 0.01$),对可溶性蛋白含量影响显著($P < 0.05$)。

2.4 加气灌溉对辣椒氮素吸收的影响

由图 5(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))可见,低水量处理可以显著增加辣椒氮素吸收量,随着加气量的增加,辣椒氮素吸收量先增加后减少,较对照处理均显著增加,加气处理下辣椒果实和叶片的氮素吸收量较对照均显著增加,这表明加气促进了氮素在辣椒果实及叶片中的分配,叶面积增加,光合作用增强,从而提高辣椒产量。其中处理 AW1 氮素吸收量最大,为 979.47 kg/hm²,较

处理 CW1 增加 44.61%，较 AW2 增加 24.06% ($P < 0.05$)。处理 AW2 较 OW2、CW2 氮素吸收量分别增加 32.74% 和 66.56% ($P < 0.05$)。结果表明加气低水量处理可以显著增加辣椒氮素吸收量,且根部加气可以缓解高灌水量下的辣椒根区低氧胁迫,促进辣椒氮素吸收。

2.5 辣椒产量、品质指标、IWUE 及根系特征间的相关分析

辣椒产量、品质指标、IWUE 及根系特征指标共存在 40 对显著或极显著相关关系(表 6)。其中,产量与 BRIX 含量、可溶性蛋白含量间存在极显著相关,与根冠比和 IWUE 呈现极显著负相关($P < 0.01$),这说明在加气灌溉下,根系形态得到有效的提高,增大了根系与土壤的接触面积,从而增加了植株对土壤中水分和养分的吸收,进而产量得到提高。BRIX 含量与可溶性蛋白含量、糖酸比(SAT)和根系特征指标(除根冠比外)呈现极显著正相关($P < 0.01$)。ACID 含量与 SAT、总根长和根表面积呈显著负相关。可溶性蛋白含量与 SAT、根干质量、根体积和根表面积呈现极显著正相关,与根冠比呈现极显著负相关($P < 0.01$)。SAT 与总根长和根表面积呈极显著正相关。根干质量与总根长、根体积、根表面积呈极显著正相关,与根冠比和 IWUE 呈极显著负相关,说明随着灌水量的增加,对根系生长会起到一定的抑制作用,不利于作物品质的提升。总根长和根体积与根表面积均呈现显著正相关。根冠比与产量、BRIX 含量、可溶性蛋白含量、根干质量、总根长、根体积和根表面积呈现显著负相关($P < 0.01$),与 SAT 呈显著负相关($P < 0.05$)。

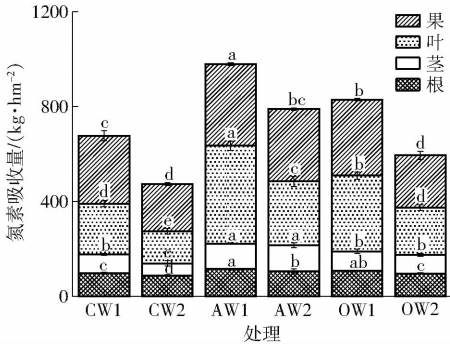


图 5 加气灌溉各处理氮素吸收量

Fig.5 Nitrogen uptake of each treatment for aerated irrigation

表 6 辣椒产量、IWUE、品质及根系特征间的相关分析

Tab.6 Correlation analysis among pepper yield, IWUE, quality and root characteristics

	BRIX 含量	ACID 含量	可溶性蛋 白含量	糖酸比	根干质量	总根长	根体积	根表面积	根冠比	IWUE
产量	0.890 **	-0.304	0.729 **	0.611 **	0.899 **	0.714 **	0.668 **	0.900 **	-0.603 **	-0.604 **
BRIX 含量	1	-0.279	0.779 **	0.621 **	0.810 **	0.604 **	0.740 **	0.890 **	-0.783 **	-0.488 *
ACID 含量		1	-0.321	-0.897 **	-0.178	-0.500 *	-0.055	-0.481 *	0.421	-0.341
可溶性蛋白含量			1	0.613 **	0.778 **	0.516 *	0.852 **	0.704 **	-0.610 **	-0.188
糖酸比				1	0.464	0.594 **	0.390	0.738 **	-0.577 *	0.068
根干质量					1	0.660 **	0.654 **	0.714 **	-0.598 **	-0.612 **
总根长						1	0.500 *	0.655 **	-0.723 **	-0.414
根体积							1	0.622 **	-0.605 **	-0.348
根表面积								1	-0.682 **	-0.285
根冠比									1	0.245
IWUE										1

2.6 基于产量、IWUE、品质和根系形态的加气灌溉处理综合评价

由于辣椒产量、IWUE、果实品质指标以及根系形态之间存在显著相关性,且单独的任何一项指标

并不能全面地评判其性能,直接进行综合评价又会产生信息重复,故需对辣椒各项指标在损失很少信息的前提下转换为多个综合指标进行综合分析及评价。

经过主成分分析,提取出特征值大于 1 的 3 个主成分,累计方差贡献率为 93.40%,因子荷载和方差贡献率如表 7 所示。其中,主成分 1 方差贡献率为 65.74%,主要与产量、BRIX 含量、SAT、根干质量、总根长、根体积和根表面积呈正相关,而且因素间呈正相关($P < 0.01$),相关系数大于 0.7,其贡献率由大到小依次为根表面积、BRIX 含量、产量、总根长、SAT、根干质量、根体积,表明主成分 1 综合得分 z_1 随着产量、BRIX 含量、SAT、根干质量、总根长、根体积或根表面积增加而增加。主成分 2 方差贡献率为 17.51%,主要受到根体积和 ACID 含量的正影响,SAT 和 IWUE 的负影响,因此主成分 2 综合得分 z_2 随着根体积和 ACID 含量增加而增加,随着 SAT 和 IWUE 增加而减少。主成分 3 方差贡献率为 10.15%,主要受 IWUE 的正影响,因此主成分 3 综合得分 z_3 随着 IWUE 增加而增加。

表 7 主成分因子荷载和方差贡献率

Tab.7 Principal component factor load and variance contribution rate			
因素	因子荷载		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3
产量	0.900	0.281	0.087
BRIX 含量	0.923	0.213	0.304
ACID 含量	-0.608	0.702	0.351
可溶性蛋白含量	-0.890	0.417	0.153
糖酸比	0.872	-0.427	-0.139
根干质量	0.868	0.490	0.001
总根长	0.873	0.084	-0.445
根体积	0.741	0.509	0.177
根表面积	0.933	-0.072	0.271
根冠比	-0.839	0.027	-0.052
IWUE	0.098	-0.665	0.738
特征值	7.232	1.926	1.116
方差贡献率/%	65.74	17.51	10.15
累计方差贡献率/%	65.74	83.25	93.40

结合 3 个主成分的方差贡献率,可得到基于产量、IWUE、品质及根系指标的各处理综合评价线性函数为

$$z = 0.6574z_1 + 0.1751z_2 + 0.1015z_3 \quad (4)$$

式中 z ——各处理综合得分

首先将原始数据进行标准化,以消除量纲的影响。然后代入式(4),即可得到各处理的综合得分和排名(表 7、8)。排名前三的均为加气灌溉处理,且处理 AW1 综合排名是第 1 位,综合得分为 3.18, z_1 和 z_2 最高,即产量、品质(BRIX 含量和 SAT)和根系生长指标(根干质量、总根长、根体积和根表面积)具有最高值(表 4、5)。排名第 2 位的是处理 AW2,综合得分为 1.05,因为它的 z_1 和 z_3 较高,即 ACID 具有最高值(表 5)。灌水量增加和加气量的

增加,均会降低处理的综合排名。

表 8 基于辣椒产量、IWUE、品质及根系形态的各处理综合得分

Tab.8 Comprehensive score of each treatment based on yield, IWUE, quality and root morphology					
处理	z_1	z_2	z_3	综合得分	综合排名
CW1	-0.67	0.29	-1.31	-0.52	4
CW2	-4.02	-1.65	0.74	-2.95	6
AW1	4.15	2.12	-0.25	3.18	1
AW2	1.39	-0.30	1.86	1.05	2
OW1	-0.32	0.35	0.05	-0.14	3
OW2	-0.52	-0.81	-1.08	-0.62	5

3 讨论

根系是作物与外界环境营养物质传输的媒介,土壤中水分、养分、温度等因素均可以直接影响根系生长与分布,从而影响到地上部器官的生长发育和形态的组成,最终影响作物产量^[20]。在本研究中,加气灌溉辣椒根系形态较对照均有所增加(除根冠比外),其中加气对辣椒根表面积影响最为显著(表 4),较对照处理显著增加 61.67% ($P < 0.01$),这是因为通过在灌溉水中增加氧气,改善根区土壤通气性,减缓根区低氧胁迫^[21],根表面积增大,使根系在土壤中的扩展程度与根吸收养分的范围得到了增加^[22],从而促进根区土壤水分和养分通过根系向地上部分输送营养^[23-24],作物生长,地上部植株鲜质量增加,进而提高果实产量和水分利用效率,提升辣椒品质。前人研究亦发现加气可以改善根区土壤低氧环境,提高作物根长、根系活力^[12]、根体积及根尖数,其中总根长和根表面积与对照相比分别增加 34.76% ~ 82.12%、33.78% ~ 63.14%,根叉数和表面积的增加,提高了土壤中吸收养分的面积^[25]。本研究通过 Pearson 相关性分析发现(表 6),根系总长度和根系表面积及总干质量有极显著正相关关系,与根系总体积有显著正相关关系。说明土壤根区加气为根系有氧呼吸提供了更多的氧气,使根系长度增加,且增加了根系的表面积和体积,根系生长状况的改善间接影响整个植株的干物质积累,提高作物产量和品质,这一结论与前人研究结论一致^[26]。

作物的产量和品质是衡量作物效益的重要指标,果实品质也决定着其市场价值,而水分作为果蔬品质形成的重要媒介,可调整光合产物在营养器官和生殖器官间的分配比例,降低叶面积指数,改善内部同化产物的运输和分配,从而改善果蔬品质^[27]。本研究表明,低水量加气灌溉增加辣椒产量和 IWUE,同时也提升辣椒品质。这与 LI 等^[28]的研究发现加气灌

溉使得温室番茄果实中的番茄红素含量、维生素 C 含量、糖酸比分别显著增加 2%、41% 和 43% 相一致。这是因为当土壤中水气比达到最佳平衡时,作物对养分及水分的吸收才会达到最优,加气灌溉向土壤中输送富含微型气泡的水气混合物,在调节土壤中水气比的同时,增大了土壤中的氧气含量,增加了土壤微生物的丰度和根系呼吸^[29],改善土壤微环境^[30],作物根系活力得到了显著提高^[24],促进根系的吸水能力和养分吸收,改变氮素在作物器官的分配比例。因此加气灌溉能够促进根系生长,增强养分吸收,进而影响植株地上部的生长^[31],叶片光合作用增强,进而提高作物产量和品质^[32-33]。

本试验通过采用主成分分析对 6 个处理进行综合排名,加气灌溉的 3 个处理均排名靠前。由此可知加气灌溉对提高辣椒产量、灌溉水利用效率、根系形态及果实品质起到了显著性作用。综合得分第 1 位和第 2 位分别为处理 AW1 和 AW2,主要受产量、BRIX 含量、SAT、根干质量、总根长、根体积、根表面积的正影响,且 7 个因子间极显著正相关,可以得出,W1 灌水水平加气处理可有效提高辣椒灌溉水利用效率,促进根系生长,根表面积增加,根的吸收能力增强,地上部器官对水分和养分的吸收增加,辣椒果实品质得到改善。过高的灌水可能导致作物随意生长,或者根区水分过多造成低氧胁迫,反而抑制根区将土壤中的水分及养分传输,导致减产及果实

品质下降,但本研究结果发现,高水量下加气可以通过增大土壤中的水氧含量,减缓根区低氧胁迫,提高产量和水分利用率。但是随着加气量的增大,作物的产量、灌溉水利用效率、根系形态指标及果实品质指标均相应减少,原因可能是加气量为 15 mg/L 时已经解除了低氧胁迫,达到辣椒根区生长适宜的氧气含量,相反溶氧量过高造成气蚀使土壤中的酶活性及土壤微生物丰度增加,促进了温室气体的排放,对辣椒根系产生伤害^[34],造成氮素的损失^[35],抑制作物生长^[36]。

4 结论

- (1)加气灌溉可以显著提高辣椒根干质量、根体积、根表面积、BRIX 含量、可溶性蛋白含量、SAT、产量和 IWUE,且在加气量 15 mg/L、0.8 倍作物-蒸发皿系数的条件下最优,较对照处理分别显著增加 13.63%、59.47%、61.67%、29.49%、75.24%、68.10%、42.89% 和 42.89% ($P < 0.05$)。
- (2)加气灌溉可以减缓高灌水量下的根区低氧胁迫,提高根系形态,基于相关分析和主成分分析,综合考虑根系形态、产量、IWUE 及果实品质,根系形态对作物产量及品质具有显著的正相关关系,根系形态在加气灌溉下对辣椒产量和品质有显著促进作用。加气量为 15 mg/L、灌水量为 0.8 倍作物-蒸发皿系数时可兼顾提质、增产、节水需求。

参 考 文 献

[1] 张作合,张忠学,李铁成,等.水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的 ^{15}N 示踪分析[J].农业机械学报,2021,52(6):295-304.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. ^{15}N tracer analysis of nitrogen uptake and utilization by rice roots under water and biochar management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 295-304. (in Chinese)

[2] 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.

[3] 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.

[4] ZHOU Y, BASTIDA F, LIU Y, et al. Impacts and mechanisms of nanobubbles level in drip irrigation system on soil fertility, water use efficiency and crop production: the perspective of soil microbial community[J]. Journal of Cleaner Production, 2022; 333: 130050.

[5] MACHADO R M, DO R M, OLIVEIRA G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation[J]. Plant Soil, 2003, 255: 333-341.

[6] FUKAO T, BAILEY-SERRES J. Plant responses to hypoxia—is survival a balancing act? [J]. Trends in Plant Science, 2004, 9(9): 449-456.

[7] HORCHANI F, ASCHI-SMITI S, BROUQUISSE R. Involvement of nitrate reduction in the tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants to prolonged root hypoxia [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32(6): 1113-1123.

[8] LI Z, ZHANG R, WANG X, et al. Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in northwestern China: effects of plastic mulching and drip irrigation [J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 178-185.

[9] ELSE M A, COUPLAND D, DUTTON L, et al. Decreased root hydraulic conductivity reduces leaf water potential, initiates stomatal closure and slows leaf expansion in flooded plants of castor oil (*Ricinus communis*) despite diminished delivery of ABA from the roots to shoots in xylem sap[J]. Physiologia Plantarum, 2001, 111: 46-54.

[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] 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.
LEI Hongjun, JIN Cuicui, HU Shiguo, et al. Effects of aerated subsurface drip irrigation on soil aeration under greenhouse purple eggplant cropping system[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2019, 40(3):325-331. (in Chinese)

[12] NIU W, JIA Z, ZHANG X, et al. Effects of soil rhizosphere aeration on the root growth and water absorption of tomato[J].

- Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(12):1364–1371.
- [13] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertosol[J]. Crop & Pasture Science, 2013, 64: 1171–1181.
- [14] 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)
- [15] 魏驰林, 王振华, 张金珠, 等. 基于加工番茄产量与品质的加气灌溉处理综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3): 122–127.
- WEI Chilin, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Comprehensive evaluation of aerated irrigation treatment based on yield and quality of processing tomato[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(3): 122–127. (in Chinese)
- [16] ZHOU Y, ZHOU B, XU F. Appropriate dissolved oxygen concentration and application stage of micro-nano bubble water oxygation in greenhouse crop plantation [J]. Agricultural Water Management, 2019, 223(C): 105713.
- [17] 雷宏军, 肖哲元, 张振华, 等. 水氮耦合氧灌对温室辣椒土壤肥力及细菌群落的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 158–166.
- LEI Hongjun, XIAO Zheyuan, ZHANG Zhenhua, et al. Effects of oxygen and nitrogen coupled irrigation on soil fertility and bacterial community under greenhouse pepper cropping system[J]. Transactions of the CASE, 2021, 37(1): 158–166. (in Chinese)
- [18] 王书勤, 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.
- WAN Shuqin, YAN Zhenkun, KANG Yuehu, et al. Using soil matric potential underneath the drip emitter to regulate soil moisture distribution and improve greenhouse tomato production[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 1–11. (in Chinese)
- [19] 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.
- LEI Hongjun, YANG Hongguang, LIU Huan, et al. Characteristics and influencing factors of N_2O emission from greenhouse tomato field soil under water-fertilizer-air coupling drip irrigation[J]. Transactions of the CASE, 2019, 35(11): 95–104. (in Chinese)
- [20] HUANG J, HU T, YASIR M, et al. Root growth dynamics and yield responses of rice (*Oryza sativa* L.) under drought-flood abrupt alternating conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 157(6): 11–25.
- [21] 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.
- WANG Zhenhua, CHEN Xiaojie, LÜ Desheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of processing tomato under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the CASE, 2020, 36(19): 66–75. (in Chinese)
- [22] SUN C X, WANG D, SHEN X B, et al. Effects of biochar, compost and straw input on root exudation of maize (*Zea mays* L.): from function to morphology[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 297(3): 106952.
- [23] BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Oxygation of clayey soils by adding hydrogen peroxide to the irrigation solution: lysimetric experiments[J]. Rhizosphere, 2016, 2: 1–11.
- [24] 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.
- ZHAO Xu, LI Tianlai, SUN Zhouping. Effects of substrate-aeration cultivation pattern on tomato growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 74–78. (in Chinese)
- [25] LI Y, NIU W, ZHANG M, et al. Artificial soil aeration increases soil bacterial diversity and tomato root performance under greenhouse conditions[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(12): 1443–1461.
- [26] XU C, WANG D, CHEN S, et al. Effects of aeration on root physiology and nitrogen metabolism in rice[J]. Rice Science, 2013, 20(2): 148–153.
- [27] 王峰, 杜太生, 邱让建, 等. 调亏灌溉对温室辣椒产量、品质及水分利用效率的影响[C]//现代节水高效农业与生态灌区建设(上), 2010: 466–474.
- WANG Feng, DU Taisheng, QIU Rangjian, et al. Effects of regulated deficit irrigation on yield, quality and water use efficiency of solar greenhouse hot pepper [C]// Modern Water-saving and High-efficiency Agriculture and Ecological Irrigation District Construction (Part 1), 2010: 466–474. (in Chinese)
- [28] LI Y, NIU W, DYCK M, et al. Yields and nutritional of greenhouse tomato in response to different soil aeration volume at two depths of subsurface drip irrigation[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 39307.
- [29] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 163–172.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse [J]. Transactions of the CASE, 2017, 33(21): 163–172. (in Chinese)
- [30] LI Y, NIU W, WANG J, 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.
- [31] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(3): 385–388.
- LIANG Yunjiang, YI Yanli, XU Guangbo, et al. Research progress and prospect of coupling effect between water and fertilizers [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2006, 45(3): 385–388. (in Chinese)
- [32] NIU W, FAN W, PERSAUD N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. Pedosphere, 2013, 23: 790–798.
- [33] 张倩, 曾健, 张振华, 等. 循环曝气地下滴灌下温室番茄生长特性与产量研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 365–377.
- ZHANG Qian, ZENG Jian, ZHANG Zhenhua, et al. Impact of cycle aerated subsurface drip irrigation on growth characteristics and yield of greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 365–377. (in Chinese)
- [34] DEL R L A. ROS and RNS in plant physiology: an overview [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(10): 2827–2837.
- [35] AUNG O, SHIGETO S, SHOJI M, et al. Aerated irrigation and pruning residue biochar on N_2O emission, yield and ion uptake of komatsuna[J]. Horticulturae, 2018, 4(4): 33.
- [36] CHEN X, DHUNGE 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.