

基于 Logistic 模型的加气灌溉辣椒生长特性和产量研究

肖哲元¹, 雷宏军^{1*}, 张振华², 张倩³, 金翠翠¹, 孙克平¹

(1.华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046; 2.鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 3.山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:【目的】探明加气灌溉对土壤通气性、温室辣椒生长特性及产量的影响, 为设施栽培条件下蔬菜增产增效提供理论依据。【方法】以辣椒为研究对象, 设置施氮量 N_1 (225 kg/hm²) 和 N_2 (300 kg/hm²)、加气量 C (加气率 0%) 和 A (加气率 15%)、灌水量 W_1 (682.8 m³/hm²) 和 W_2 (1 024.2 m³/hm²) 的 3 因素 2 水平试验, 采用 Logistic 模型拟合辣椒株高生长动态并定量分析其生长特征, 研究不同处理土壤通气性、辣椒干物质量和产量的变化。【结果】灌水后第 2 d, 相同施氮量和加气量下, 土壤充水孔隙率 (WFPS) 随灌水量的增加而显著增加; 相同施氮量和灌水量下, 加气处理相比不加气处理的土壤氧气扩散速率 (ODR) 有显著提升。在开花坐果期, 加气灌溉对促进辣椒株高生长的效果最显著, 增幅在 9.0% 以上。不同处理辣椒株高变化符合 Logistic 模型, 且拟合度 R^2 均在 0.980 以上, 加气处理的株高最大增长速率和快速增长期平均增长速率较不加气处理分别提高了 13.0% 和 11.8%。辣椒地上部干物质量和单株产量随加气量、施氮量和灌水量的增加而增加, 其中 N_2AW_2 处理的单株产量最高 (324.63 g/株), 且产量与土壤 ODR 和株高呈正相关。【结论】加气灌溉可显著改善土壤通气状况, 促进辣椒生长及干物质量积累和产量提升。利用 Logistic 模型可较为准确地描述辣椒株高生长动态, 为设施作物在加气灌溉条件下的动态生长模拟提供理论依据。

关键词: 辣椒; 加气灌溉; Logistic 模型; 生长特性; 产量

中图分类号: S626.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022138

OSID:



肖哲元, 雷宏军, 张振华, 等. 基于 Logistic 模型的加气灌溉辣椒生长特性和产量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 16-23.

XIAO Zheyuan, LEI Hongjun, ZHANG Zhenhua, et al. Modelling Growth and Yield of Aerated Pepper by the Logistic Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 16-23.

0 引言

【研究意义】滴灌水肥一体化技术能有效减少作物蒸散发并提高水肥利用效率, 近年来被广泛应用。然而, 长时间滴灌会造成作物根区土壤接近饱和状态, 降低作物根区土壤的透气性和氧气量^[1], 而土壤缺氧会导致根系生长发育受阻, 迟滞吸收土壤中的营养物质, 加剧肥料的淋溶和渗漏^[2]。加气灌溉作为地下滴灌的一种拓展技术, 可有效解决根区土壤缺氧问题, 改善作物根际生长环境。辣椒作为主要的设施栽培蔬菜, 在加气灌溉模式下探究其生长规律和增产增效潜力, 对促进农业增收和发展设施农业节水灌溉具有重要意义。【研究进展】Li等^[3]研究表明, 向根区土壤

加气对促进番茄生长和干物质量的积累具有积极作用。Cui等^[4]研究指出, 加气灌溉辅以施氮 240 kg/hm² 是提高温室黄瓜产量最有效的管理措施。庞婕等^[5]研究表明, 高灌水量下, 加气灌溉可显著提高番茄产量和水分利用效率。近年来, Logistic 模型已被用来定量描述辣椒^[6]、小麦、玉米^[7]等作物生长动态累计变化过程, 且表现效果普遍较好。杨慧等^[8]利用 Logistic 模型对水氮耦合条件下番茄地上部生物量及氮素累积量的动态变化进行了研究。赵娣等^[9]基于 Logistic 模型对不同水分条件下的番茄株高、叶面积指数等生长特性进行了分析, 为干旱地区农业生产提供了指导。

【切入点】然而, 以往研究大多是利用 Logistic 模型模拟不同水肥条件下作物生长发育和氮素累积状况, 而对于在加气灌溉条件下的设施辣椒生长特性的模拟却鲜有报道。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以温室辣椒为研究对象, 以生长时间为自变量, 采用 Logistic 模型拟合不同处理下的辣椒株高生长的动态变化过程, 明确加气灌溉对辣椒株高特征参数、土壤通气性、干物质量及产量的影响, 期为设施栽培

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079052); 河南省科技攻关计划项目 (212102110032); 山东省重点研发计划重大科技创新工程项目 (2019JZZY010710)

作者简介: 肖哲元 (1992-), 男, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xzy150610@126.com

通信作者: 雷宏军 (1975-), 男, 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

条件下蔬菜增产增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2019年9月11日—12月26日在华北水利水电大学农业高效用水实验场现代化温室中进行,该地区属北温带大陆性季风气候,年平均日照时间为2 400 h,无霜期220 d。温室内装有风机和湿帘,以调节室内温度和空气湿度。温室内的气温变化范围在10.5~32.2 °C之间,相对湿度变化范围在32.5%~90.3%之间(图1)。供试土壤为黏质壤土,土壤剖面质地均匀,种植前土壤基础理化性质见表1。

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

pH 值	土壤体积质量/(g cm ⁻³)	田间持水率/%	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	全磷量/(g kg ⁻¹)	全钾量/(g kg ⁻¹)
6.51	1.38	28	22.41	1.02	0.86	29.54

1.2 试验设计

试验采用3因素2水平的完全随机区组设计,设置施氮量(N₁: 225 kg/hm²、N₂: 300 kg/hm²)、加气量(不加气C、加气A)和灌水量(W₁: 682.8 m³/hm²、W₂: 1 024.2 m³/hm²) 3个因素,共8个处理,每个处理重复4次,共计32个小区,每个小区面积为2 m²,具体的试验设计见表2。各小区通过地下滴灌系统供水,供水压力为0.10 MPa。不加气处理利用首部供水装置进行供水,加气处理利用储水管路、循环泵、文丘里空气射流器(Mazzei air injector 684, 美国Mazzei Corp公司)等设备循环曝气20 min,制得加气比率为15%的加气水^[10]。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)测定。土壤基质势下限控制在(-30±5) KPa^[11]。灌水量根据式(1)计算:

$$W=0.1A \times E_p \times K_p, \quad (1)$$

式中:W为各处理每次的灌水量(m³/hm²);A为小区控制面积(m²);E_p为1个灌水周期内Φ601蒸发皿的蒸发量(mm);K_p为作物-蒸发皿系数,W₁处理取0.6,W₂处理取0.9;0.1为单位换算系数。

试验小区采用地下滴灌供水方式,滴灌带型号为JOHN DEERE,直径为16 mm,壁厚为0.6 mm,埋深为15 cm,滴头额定流量为1.2 L/h,滴头间距为33 cm,为防止水分侧渗,相邻小区间用塑料膜隔开。选用的辣椒品种为“豫艺鲜辣8号”,于2019年9月11日选取长势相同的幼苗进行移植,种植密度为3株/m²,在移植后的12 d覆膜,全生育期共计107 d。生育期具体划分为:苗期(20190911—0928)、开花坐

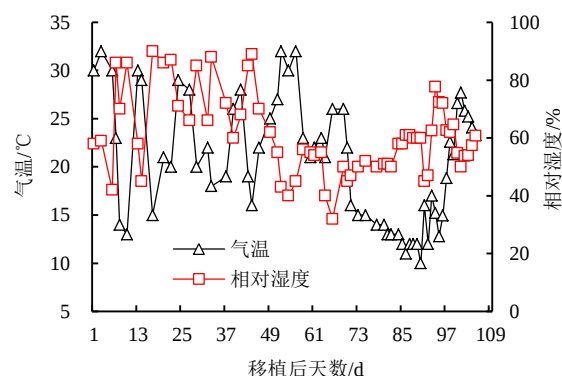


图1 温室辣椒生育期空气温度和相对湿度

Fig.1 Relative humidity and air temperature dynamics during greenhouse growing cropping season

果期(20190929—1030)、果实膨大期(20191031—1130)、成熟期(20191201—1226)。

供试肥料为水溶性施乐多(含硝态氮量7.1%,铵态氮量1.1%,脲态氮量6.9%,P₂O₅量15%,K₂O量30%,螯合态微量元素Fe量0.1%,Mn量0.05%,Zn量0.15%,Cu量0.05%,Mo量0.05%,B量0.1%,中国康拓肥料有限公司生产),采用文丘里施肥器将其掺入水流后随水施入田间。

1.3 项目测定

1.3.1 土壤通气性测定

选取辣椒果实膨大期的一个完整灌水周期进行土壤通气性监测,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,中国制造)测定土壤氧气扩散速率(Oxygen Diffusion Rate, ODR),在距离植株茎秆横向5 cm、深度20 cm处理设参比电极、铜电极和铂金电极,测定时间为每日的09:00和15:00。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	施氮量/(kg hm ⁻²)	加气率/%	灌水量/(m ³ hm ⁻²)
N ₁ CW ₁	225	0	682.8
N ₁ AW ₁	225	15	682.8
N ₁ CW ₂	225	0	1 024.2
N ₁ AW ₂	225	15	1 024.2
N ₂ CW ₁	300	0	682.8
N ₂ AW ₁	300	15	682.8
N ₂ CW ₂	300	0	1 024.2
N ₂ AW ₂	300	15	1 024.2

采用土壤湿度记录仪(FDS-100,邯郸市清胜电子科技有限公司)测定20 cm土层深度处的土壤质量含水率,水分传感器埋设于相邻2株作物的中间,测

定期间利用烘干法进行标定^[11]。土壤充水孔隙率(Soil water-filled pore space, *WFPS*)参照 Du 等^[12]的计算方法进行测定。

1.3.2 辣椒株高动态模拟

在每个小区随机标记长势均匀的 3 株植物,从移植后的第 10 天开始,每 7~10 d 测量 1 次株高。采用 Logistic 模型对辣椒株高进行非线性回归拟合(式(2)),对式(2)求导可得其增长速率方程(式(3)),根据式(2)和式(3)可求出辣椒株高的各特征参数值^[13]。定义 V_1 和 t_1 分别代表最大增长速率和对应的移植天数, t_2 和 t_3 为生长曲线上的 2 个拐点, V_2 代表快增期的平均增长速率。 t_1 、 t_2 、 t_3 构成了辣椒生长曲线上的 3 个关键点,具体表示为: $0 \sim t_2$ 为渐增期、 $t_2 \sim t_3$ 为快增期、 $t_3 \sim \infty$ 为缓增期。

$$Y = \frac{a}{1 + be^{-kt}}, \quad (2)$$

$$V = \frac{abke^{-kt}}{(1 + be^{-kt})^2}, \quad (3)$$

式中: Y 为辣椒株高 (cm); t 为移植后天数 (d); a 、 b 和 k 为模型固定系数。

1.3.3 生物量和产量测定

辣椒成熟期,在每个小区随机选取 3 株长势一致的植株,破坏性取样后称取植株地上和地下部样品鲜质量,在鼓风干燥箱中在 105 °C 条件下杀青 30 min 后,在 75 °C 条件下烘干至恒定质量,采用精度为 0.01 g 的电子秤称取干质量。辣椒成熟后采收果实并称质量,每个小区除去首末两端的 1 株植株,选择剩余 4 株测定其单株产量,取平均值作为该处理的 1 个重复,每个处理设 4 个重复。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据处理和绘图,通过 SPSS

22.0 统计软件拟合 Logistic 生长模型并进行方差分析、Pearson 相关分析及显著性检验。模型有效性采用效率系数 (Nash-sutcliffe efficiency coefficient, E)^[14] 和标准化均方根误差 (Normalized root mean squared error, $nRMSE$)^[13] 进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤通气性的动态变化

由图 2 可知,不同处理的土壤充水孔隙率(*WFPS*)变化动态基本一致,灌水后均呈先升高后下降的变化趋势。在灌水后的第 2 天下午, N_1 施氮水平下的 N_1AW_2 处理和 N_1CW_2 处理土壤 *WFPS* 达到较高水平,分别为 77.4% 和 74.7%,相比 N_1AW_1 处理和 N_1CW_1 处理分别提高了 14.5% 和 12.7%; N_2 施氮水平下的各处理土壤 *WFPS* 在灌水周期内基本表现为 N_2CW_2 处理 > N_2AW_2 处理 > N_2CW_1 处理 > N_2AW_1 处理,在灌水后第 2 天下午差异达到最大, N_2CW_2 处理和 N_2AW_2 处理较 N_2CW_1 处理和 N_2AW_1 处理的土壤 *WFPS* 分别提高了 13.6% 和 12.2% ($P < 0.05$)。加气量和施氮量的变化对土壤 *WFPS* 无显著影响。

灌水后不同处理土壤 *ODR* 均呈先下降后上升、之后逐渐趋于平缓的变化趋势(图 3)。相同灌水量和施氮量下,加气处理的土壤 *ODR* 平均高于不加气处理,在灌水后第 2 天上午最为显著,此时 N_1AW_1 、 N_1AW_2 、 N_2AW_1 处理和 N_2AW_2 处理均已回升到较高水平,平均达到 $59.81 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$ 。其中, N_1AW_1 处理和 N_1AW_2 处理较 N_1CW_1 处理和 N_1CW_2 处理的土壤 *ODR* 分别提高了 29.9% 和 37.9%, N_2AW_1 处理和 N_2AW_2 处理较 N_2CW_1 处理和 N_2CW_2 处理的土壤 *ODR* 分别提高了 24.5% 和 35.3%。不同灌水量和施氮量对土壤 *ODR* 无显著影响。

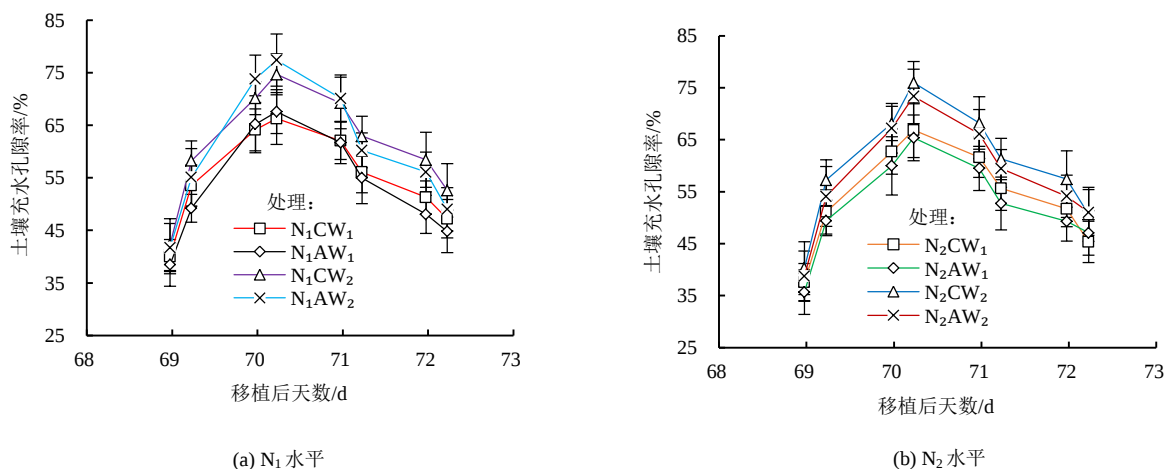


图 2 不同处理土壤充水孔隙率动态变化

Fig.2 Dynamics of soil *WFPS* under different treatments

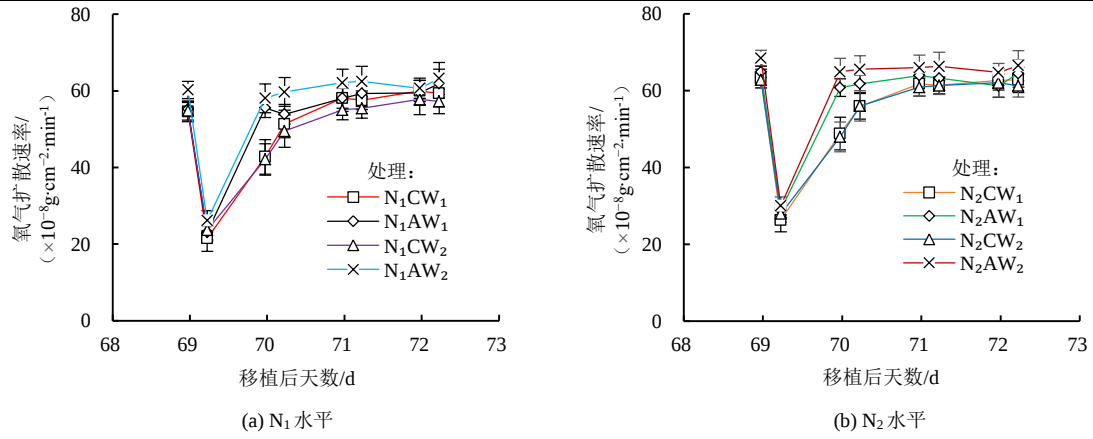


图3 不同处理土壤氧气扩散速率动态变化

Fig.3 Dynamics of soil ODR under different treatments

2.2 不同处理辣椒株高动态变化

由图4可知,不同处理辣椒株高随时间的动态变化趋势相同,均呈现“慢-快-慢”的S型变化趋势。移植后的49 d,相同施氮量和灌水量下,与不加气处理相比,加气处理对辣椒株高的影响差异最显著。其中, N_1AW_1 处理和 N_1AW_2 处理的辣椒株高相比 N_1CW_1 处理和 N_1CW_2 处理分别增加了11.8%和9.1%; N_2AW_1 处理和 N_2AW_2 处理的株高较 N_2CW_1 处理和 N_2CW_2 处理分别增加了10.2%和9.1%。在开花坐果期,加气灌溉能有效增加土壤氧气量,提高根系呼吸作用,增强根系对养分的吸收,进而促进辣椒生长。

采用Logistic模型对不同处理辣椒株高动态过程进行拟合,拟合方程和有效性检验见表3。各处理拟合方程的相关参数变化幅度较小,决定系数 R^2 均在0.980以上,且均达到了极显著水平($P<0.01$),各处理实测值与模拟值的效率系数 E 在0.818~0.903之间,标准化均方根误差 $nRMSE$ 在4.14%~5.78%之间,小于10%,说明该模型可以准确地模拟辣椒株高动态随时间的变化过程,模拟值与实测值有较高的吻合度。相同灌水量和施氮量下,不加气处理的辣椒株高理论最大值平均为67.68 cm,而加气处理的辣椒株高理论最大值平均为70.43 cm,二者相差2.75 cm。

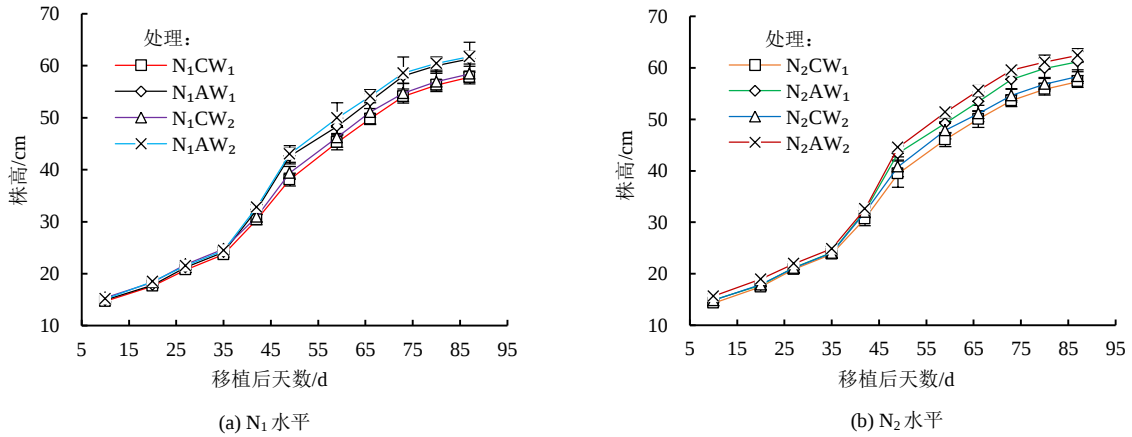


图4 不同处理辣椒株高动态变化

Fig.4 Dynamics of pepper plant height under different treatments

表3 不同处理辣椒株高生长过程模拟及有效性检验

Table 3 Plant height growth equation fitting and model validity for pepper under different treatments

处理	拟合方程	模型有效性检验		
		决定系数 R^2	效率系数 E	$nRMSE/\%$
N_1CW_1	$Y=69.06/(1+7.28e^{-0.044t})$	0.991**	0.903	4.14
N_1AW_1	$Y=70.63/(1+8.14e^{-0.048t})$	0.987**	0.870	4.93
N_1CW_2	$Y=69.48/(1+6.84e^{-0.043t})$	0.990**	0.897	4.16
N_1AW_2	$Y=70.60/(1+8.09e^{-0.049t})$	0.986**	0.860	5.09
N_2CW_1	$Y=66.01/(1+7.36e^{-0.047t})$	0.990**	0.896	4.27
N_2AW_1	$Y=69.53/(1+8.28e^{-0.050t})$	0.985**	0.848	5.33
N_2CW_2	$Y=66.17/(1+7.44e^{-0.048t})$	0.987**	0.873	4.68
N_2AW_2	$Y=70.94/(1+8.15e^{-0.050t})$	0.982**	0.818	5.78

注 **表示在 $P<0.01$ 水平上存在显著性差异,下同。

2.3 不同处理辣椒株高增长速率及特征参数分析

图5为不同处理Logistic拟合方程求一阶导数后得到的辣椒株高增长速率动态曲线。各处理辣椒株高增长速率为单峰曲线,且随移植时间的推移整体呈先增加后下降的变化趋势。相同施氮量和灌水量下,移植后35~49 d,与不加气处理相比,加气处理的株高增长速率增幅最快。以移植后35 d为例, N_1AW_1 处理和 N_1AW_2 处理的株高增长速率较 N_1CW_1 处理、 N_1CW_2 处理分别提高了12.5%和16.7%; N_2AW_1 处理和 N_2AW_2 处理的株高增长速率较 N_2CW_1 、 N_2CW_2 处理分别提高了12.0%和11.7%。

进一步对Logistic拟合方程求二阶导数得到株高

累计特征参数值,结果见表4。不同处理在开花坐果期(移植后41.81~45.12 d)辣椒株高生长达到其最大增长速率。其中, N_2AW_2 处理的株高最大增长速率和快增期平均增长速率最高,分别达到0.89 cm/d和0.78 cm/d, N_1CW_2 处理最低,仅为0.75 cm/d和0.65 cm/d。加气处理的株高快增期持续时间较不加气处理平均提前了4.51 d。株高最大增长速率和快增期平均增长速率在加气处理下平均为0.87 cm/d和0.76 cm/d,不加气处理下平均为0.77 cm/d和0.68 cm/d,加气处理较不加气处理分别提高了13.0%和11.8%。综上,在辣椒生长活跃期向根区土壤通气可有效提高辣椒株高增长速率,为营养生长向生殖生长的过渡奠定基础。

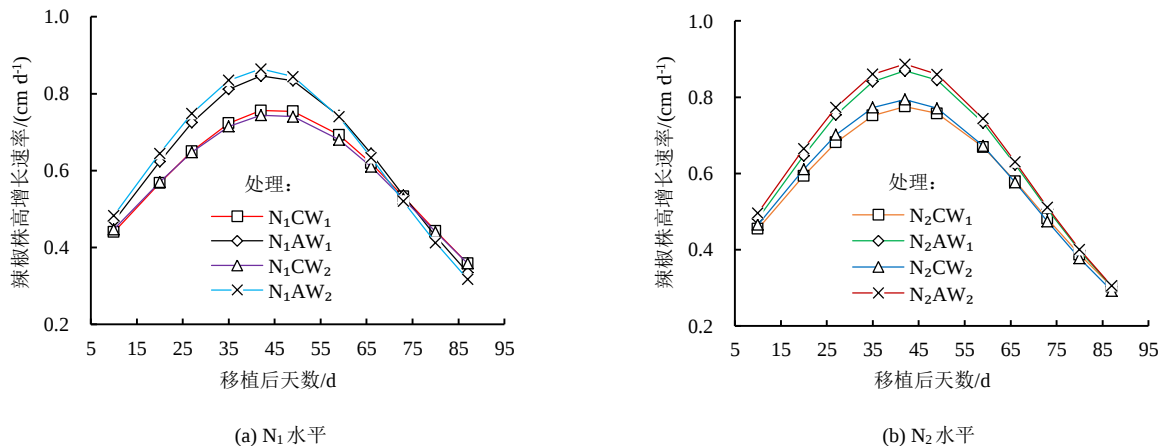


图5 不同处理辣椒株高增长速率动态变化曲线

Fig.5 Variation curves of pepper plant height growth rate under different treatments

表4 不同处理辣椒株高动态随生育期变化的特征参数

Table 4 Plant height dynamics of pepper on the eigenvalues with different growth stages under different treatments

处理	辣椒株高主要特征参数					
	t_1/d	t_2/d	t_3/d	$\Delta t/d$	$V_1/(cm\ d^{-1})$	$V_2/(cm\ d^{-1})$
N_1CW_1	45.12	15.19	75.05	59.86	0.76	0.67
N_1AW_1	43.68	16.25	71.12	54.87	0.85	0.74
N_1CW_2	44.72	14.09	75.34	61.25	0.75	0.65
N_1AW_2	42.67	15.79	69.54	53.75	0.86	0.76
N_2CW_1	42.47	14.45	70.49	56.04	0.78	0.68
N_2AW_1	42.28	15.94	68.62	52.68	0.87	0.76
N_2CW_2	41.81	14.37	69.25	54.87	0.79	0.70
N_2AW_2	41.96	15.62	68.30	52.68	0.89	0.78

注 t_1 为最大增长速率所对应的移植天数, t_2 、 t_3 为快增期的开始和结束时间, Δt 为快增期持续时间, V_1 为最大增长速率; V_2 为快增期平均增长速率。

2.4 不同处理对辣椒干物质及产量的影响

由表5可知,单因素下,施氮量、加气量对辣椒干物质和单株产量均具有极显著影响,灌水量对地上部干物质和单株产量具有极显著影响,且对地下部干物质具有显著影响;水氮交互作用对地上部干物质会产生极显著影响,其他因素的交互作用均对辣椒干物质和单株产量无显著影响。

本试验条件下,不同处理对辣椒地下部干物质无显著影响。相同施氮量和灌水量下,加气处理较不加气处理能显著增加辣椒地上部干物质和产量。其

中,在 N_1 施氮水平下, N_1AW_2 处理的辣椒地上部干物质和单株产量达到最高,分别为63.04 g/株和274.62 g/株,较 N_1CW_2 处理分别增加了18.5%和16.5%; N_2 水平下, N_2AW_2 处理的辣椒地上部干物质和单株产量分别达到了67.68 g/株和324.63 g/株,较 N_2CW_2 处理分别增加了15.7%和17.0%。辣椒地上部干物质和单株产量随施氮量、灌水量的增加而增加。 N_2 水平下,辣椒地上部干物质和单株产量平均为60.60 g/株和279.61 g/株,分别较 N_1 水平下的辣椒地上部干物质和单株产量增加了16.7%和17.4%;

N_2AW_2 处理较 N_2AW_1 处理的辣椒地上部干物质量和单株产量分别增加 9.5% 和 17.8%。进一步分析发现, N_2CW_1 处理的单株产量较 N_2CW_2 处理减少 13.2%, 而 N_2AW_1 处理较 N_2CW_2 处理的单株产量仅减少 0.7%, 可见加气灌溉可以缓解由于减少灌水而对辣椒产量所造成的负面影响。综上所述, 辣椒地上部干物质量和产量随加气量、施氮量和灌水量的增加而显著增加, N_2AW_2 处理效果最佳。

表 5 不同处理对辣椒干物质量及产量的影响

Table 5 Effect of different treatments on dry matter and yield of pepper

处理	地上部干物 质量/(g 株 ⁻¹)	地下部干物 质量/(g 株 ⁻¹)	单株产量/ (g 株 ⁻¹)
N_1CW_1	42.25±1.87g	8.13±0.41c	205.40±7.28d
N_1AW_1	49.31±1.51f	8.62±0.71bc	237.12±7.66c
N_1CW_2	53.18±3.16ef	8.56±0.42bc	235.76±6.40c
N_1AW_2	63.04±2.13b	9.37±0.66ab	274.62±8.39b
N_2CW_1	54.40±1.95de	8.77±0.69b	240.75±8.15c
N_2AW_1	61.80±2.96bc	9.35±0.58ab	275.54±4.09b
N_2CW_2	58.51±2.14cd	9.29±0.37ab	277.52±5.73b
N_2AW_2	67.68±3.39a	10.12±0.51a	324.63±11.15a
F 值			
施氮量 N	73.425**	9.748**	177.245**
加气量 A	68.831**	8.809**	150.863**
灌水量 W	73.595**	7.391*	152.980**
N×A	0.008	0.016	0.853
W×N	13.209**	0.013	2.070
W×A	1.281	0.403	2.457
N×A×W	0.067	0.006	0.184

注 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**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平存在显著性差异, 下同。

2.5 土壤 ODR、WFPS 和辣椒各指标之间的相关分析

本试验采摘的辣椒产量取自收获期, 故将收获前 1 个灌水周期所测土壤 ODR 和 WFPS 的平均值进行相关分析。由表 6 可知, 辣椒株高与干物质量呈极显著正相关 ($P<0.01$); 辣椒产量与土壤 ODR 呈显著正相关 ($P<0.05$), 与株高、干物质量呈极显著正相关 ($P<0.01$)。辣椒良好的生长活动有利于干物质量的积累, 进而促进产量增加, 并且产量与土壤 ODR 的相关性较高。

表 6 土壤 ODR、WFPS 和辣椒各指标间的相关关系

Table 6 Correlations among soil ODR, WFPS and different indexes of pepper

指标	ODR	WFPS	株高	干物质量	产量
ODR	1	0.208	-0.030	0.222	0.457*
WFPS		1	-0.017	0.046	0.105
株高			1	0.635**	0.555**
干物质量				1	0.883**
产量					1

3 讨论

土壤温度、含水率、透气性等表征土壤物理特性的环境因子相互作用且共同对植物的生长发育产生重要影响^[15]。ODR 可表征氧气对作物的有效性, 当阈值低于 40×10^{-8} g/(cm² min) 时将损害作物的正常生长发育^[16]。本研究发现, 灌水后第 2 天上午, 加气处理较不加气处理能显著提高土壤 ODR, 这与臧明^[17]关于增氧灌溉的氧气扩散速率和氧化还原电位较常规灌溉有显著提高, 且改善效果最少持续 24 h 的结论相似。株高表征植物纵向的拓展能力, 是植物生长发育进程中重要的动态指标之一, 且植物的生物量和产量与其关系紧密^[18]。Li 等^[19]发现, 通过向土壤注气可使番茄株高和茎粗对其产生积极的反馈。吴梅等^[20]研究表明, 与常规地下滴灌相比, 玉米的株高和茎粗在加气滴灌下显著增加 1.51%~4.88% 和 3.63%~6.22%。本试验中, 相同施氮量和灌水量下, 在开花坐果期 (移植后第 49 天) 采用加气灌溉能显著促进辣椒株高生长, 增幅在 9.0% 以上, 与前人研究结果基本一致。

作物生长模型的构建可进一步为作物动态调控提供有效支撑。罗新兰等^[21]构建了关于玉米叶面积指数的 Logistic 模型, R^2 和标准误差分别在 0.98 和 0.21 左右, 较好的预测了不同生育期玉米叶面积指数的动态变化。潘玉娇^[6]利用 Logistic 模型定量研究了辣椒叶面积指数和干物质积累量的变化过程, 模型效果表现良好。本研究以移植天数为自变量, 采用 Logistic 模型对加气灌溉条件下辣椒株高生长过程进行了模拟, 各处理的拟合方程均达到极显著水平, 能很好地描述辣椒株高生长动态。今后将开展多季试验对加气灌溉下不同作物的各项动态指标进行拟合, 进一步提高特征参数的拟合精度。Logistic 模型对其求各阶导数后能得到许多具有生物学意义的特征参数, 可定量分析作物的生长动态变化。本研究发现, 加气处理的株高快增期持续时间较不加气处理平均提前了 4.51 d。与不加气处理相比, 辣椒株高最大增长速率和快增期平均增长速率在加气处理下分别提高 13.0% 和 11.8%。这是由于加气灌溉增加了根区土壤氧气量, 辣椒根系呼吸速率增强, 进而为地上部生长奠定良好的基础。本文只分析了辣椒株高随时间的动态变化, 下一步将以有效积温为自变量, 对加气灌溉下不同温室作物的生长特性及氮素累积进行拟合分析, 为调控设施作物生长发育及精准施氮提供理论依据, 最终实现增产增效协同发展。

作物产量受气象条件、人员管理、土壤肥力等多方因素的综合影响。有研究发现, 加气灌溉下作物叶

面积^[22]、光合特性和干物质积累^[23]等指标较常规地下滴灌显著提高,良好土壤通气状况和养分供给加快了植物体内各种生理活动的运转,促进了生物量的积累和产量增加。Liu等^[24]利用微纳米气泡设备发现,加气灌溉显著增加番茄干物质质量 29.2%~67.5%和产量 7.8%~26.9%。庞婕等^[5]研究表明,土壤水分充足和适宜的溶解氧质量浓度相结合,有利于促进植株根系呼吸,提高番茄产量。以上研究结果与本试验在相同灌水和施氮条件下加气灌溉能有效促进辣椒地上部干物质质量的积累,显著提高产量结论相似。

4 结 论

1) 加气灌溉能显著改善温室辣椒土壤通气状况。相同灌水量和施氮量下,加气处理的土壤 ODR 平均高于不加气处理,灌水后第 2 天效果最显著,提升幅度在 24.0%以上。

2) 开花坐果期采用加气灌溉对促进辣椒株高生长效果最为显著,增幅在 9.0%以上。Logistic 模型可较为准确地描述辣椒株高的生长过程,加气处理的辣椒株高最大增长速率和快增期平均增长速率较不加气处理分别提高了 13.0%和 11.8%。

3) 辣椒地上部干物质质量和产量随加气量、施氮量和灌水量的增加而增加,且产量与土壤 ODR 和株高呈正相关关系。 N_2AW_2 处理(即:施氮量 300 kg/hm^2 ,灌水量 $1\,024.2\text{ m}^3/\text{hm}^2$,加气率 15%) 在促进辣椒生长及干物质质量积累和产量提升中的综合效果最佳。

参考文献:

- [1] NIU Wenquan, JIA Zongxia, ZHANG Xuan, et al. Effects of soil rhizosphere aeration on the root growth and water absorption of tomato[J]. Clean-Soil Air Water, 2012, 40(12): 1 364-1 371.
- [2] NIU Wenquan, GUO Qing, ZHOU Xiaobo, et al. Effect of Aeration and Soil Water Redistribution on the Air Permeability under Subsurface Drip Irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 815-820.
- [3] LI Yuan, NIU Wenquan, CAO Xiaoshu, et al. Growth response of greenhouse-produced muskmelon and tomato to sub-surface drip irrigation and soil aeration management factors[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 1-15.
- [4] CUI Bingjing, NIU Wenquan, DU Yadan, et al. Response of yield and nitrogen use efficiency to aerated irrigation and N application rate in greenhouse cucumber[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265(6): 109-220.
- [5] 庞婕, 韩其晟, 周爽, 等. 水气互作对温室番茄生长 产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 87-94.
- [6] 潘玉娇. 不同水分条件下辣椒生长发育与干物质积累模拟模型的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007.
- PAN Yujiao. Study on the simulation model of growth and dry matter

- accumulation of pepper under different irrigation quantity[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2007.
- [7] DING Dianyuan, FENG Hao, ZHAO Ying, et al. Effects of continuous plastic mulching on crop growth in a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 271: 385-397.
- [8] 杨慧, 曹红霞, 柳美玉, 等. 水氮耦合条件下番茄临界氮浓度模型的建立及氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1 234-1 242.
- YANG Hui, CAO Hongxia, LIU Meiyu, et al. Simulation of critical nitrogen concentration and nitrogen nutrition index of tomato under different water and nitrogen conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1 234-1 242.
- [9] 赵娣, 王振华, 张金珠, 等. 不同灌溉方式和灌水量对北疆加工番茄生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 175-185.
- ZHAO Di, WANG Zhenhua, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of different irrigation methods and irrigation amount on physiological growth and yield of processing tomato in northern xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 175-185.
- [10] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 158-166.
- [11] 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.
- 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.
- [12] DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106 152.
- [13] 陈杨, 王磊, 白由路, 等. 有效积温与不同氮磷钾处理夏玉米株高和叶面积指数定量关系[J]. 中国农业科学, 2021, 54(22): 4 761-4 777.
- CHEN Yang, WANG Lei, BAI Youlu, et al. Quantitative relationship between effective accumulated temperature and plant height & leaf area index of summer maize under different nitrogen, phosphorus and potassium levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(22): 4 761-4 777.
- [14] 王蕾, 王鹏新, 田苗, 等. 效率系数和一致性指数及其在干旱预测精度评价中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 229-235, 251.
- WANG Lei, WANG Pengxin, TIAN Miao, et al. Application of the coefficient of efficiency and index of agreement on accuracy assessment of drought forecasting models[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 229-235, 251.
- [15] 雷宏军, 肖哲元, 肖让, 等. 水 肥 气 耦 合 滴 灌 对 温 室 番 茄 生 长 和 品 质 的 影 响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 168-175.
- LEI Hongjun, XIAO Zheyuan, XIAO Rang, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupled drip irrigation on greenhouse tomato growth and fruit quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 168-175.
- [16] FENG G, WU L, LETEY J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime[J]. Soil Science, 2002, 167(8): 495-503.
- [17] 臧明. 水肥气耦合滴灌下土壤-作物响应机理研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- ZANG Ming. Study on the influencing mechanism of water-fertilizer-air coupling drip irrigation on soil crop system[D].

- Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [18] 魏湜. 玉米生态基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 40-49.
WEI Shi. Ecological Basis of Maize[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 40-49.
- [19] LI Yuan, NIU Wenquan, DYCK Miles, 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: 39 307.
- [20] 吴梅, 张金珠, 王振华, 等. 加气滴灌和可降解膜覆盖对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022(30): 1-14.
WU Mei, ZHANG Jinzhu, WANG Zhenhua, et al. Effects of aerated drip irrigation and degradable film mulching on growth and water use of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022(30): 1-14.
- [21] 罗新兰, 陈祥兰, 姚运生, 等. 东北玉米叶面积指数动态模拟模型研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(1): 91-94.
LUO Xinlan, CHEN Xianglan, YAO Yunsheng, et al. Study on dynamic simulation model of maize leaf area index in Northeast China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 91-94.
- [22] 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.
- [23] 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, LYU Wang, et al. Aerated irrigation improving photosynthesis characteristics and dry matter accumulation of greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 125-132.
- [24] LIU Y X, ZHOU Y P, WANG T Z, et al. Micro-nano bubble water oxygation: Synergistically improving irrigation water use efficiency, crop yield and quality[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 835-843.

Modelling Growth and Yield of Aerated Pepper by the Logistic Model

XIAO Zheyuan¹, LEI Hongjun^{1*}, ZHANG Zhenhua², ZHANG Qian³, JIN Cuicui¹, SUN Keping¹

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

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

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: 【Objective】Aeration is to supply oxygen to the root zone by bubbling the irrigation water. It is an effective irrigation technology to improve crop growth in heavy-textured soils with low air permeability. The aim of this paper is to experimentally study the effect of aeration on growth and yield of pepper. 【Method】The experiment was conducted in a greenhouse designed using a three-factor randomized block. It consisted of two nitrogen applications: 225 kg/hm² (N₁) and 300 kg/hm² (N₂), two aerations with the volumetric fraction of the air being 0% (C) and 15% (A) respectively, and two irrigation amounts: 682.8 m³/hm² (W₁) and 1 024.2 m³/hm² (W₂). Crop growth traits in each treatment, including plant height, dry matter and yield, were described by the logistic model. 【Result】Second day after irrigation, the water-filled soil pore space (WFPS) increased significantly ($P<0.05$) with the irrigation amount when nitrogen application and aeration were the same. Adding 15% of air bubbles to the irrigation water significantly ($P<0.05$) improved oxygen diffusion rate in the soil when other treatments were the same. Aerated irrigation boosted crop growth during the flowering and fruit bearing period most, increasing by >9.0% ($P<0.05$). The crop elongation fitted to the logistic model well regardless of the treatments, with $R^2>0.980$ ($P<0.01$). Aeration increased both maximum elongation rate and the average elongation rate over the rapid growth period of the crop by 13.0% and 11.8%, respectively, compared to the control without aeration. Similar as nitrogen application and irrigation, aeration also increased above-ground dry matter and fruit yield significantly ($P<0.05$). Of all treatments, fertilizing 300 kg/hm² of N, irrigating 1 024.2 m³/hm² of water, and adding 15% of air bubbles to the irrigation water achieved the highest yield, 324.63 g/plant. Fruit yield was positively correlated with oxygen diffusion rate and plant height. 【Conclusion】Aerated irrigation can significantly improve soil aeration, promote crop growth and accumulation of dry matter, thereby increasing fruit yield. The logistic model describes the elongation of the crop well regardless of the treatments.

Key words: pepper; aeration irrigation; Logistic model; growth characteristics; yield

责任编辑: 韩 洋