

doi:10.11937/bfyy.20215103

# 不同水分-沸石耦合策略对番茄生长特性的影响

鞠晓兰, 雷涛, 郭向红, 毕远杰, 雷震, 刘荣豪

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**以交替膜下滴灌不同水分( $W$ )-沸石( $Z$ )耦合策略下的番茄为试材,采用基于 Logistic 模型的番茄生长动态过程模拟方法,研究  $W$ 、 $Z$  及其耦合效应对番茄物候期参数(线性生长起点  $t_1$ 、线性生长终点  $t_2$ 、线性生长期  $LGD$ )和生长参数(最大线性生长速率  $MGR$ 、平均线性生长速率  $LGR$ 、线性生长量  $TLG$ )的影响,以期为交替膜下滴灌条件下番茄种植提供参考依据。结果表明:不同  $W$ - $Z$  耦合条件下番茄 S 型生长过程可划分为渐增期、线性生长期和缓增期,符合 Logistic 模型。任意  $W$  时株高、 $W_1$  时  $t_1$ 、 $t_2$  和  $LGD$ 、 $W_{0.75}$  时  $TLG$ ,以及  $W_{0.5}W_1$  时  $MGR$ 、 $LGR$ 、 $TLG$  随  $Z$  增加表现为先促后抑。 $Z_6Z_9$  时  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $LGD$  和任意  $Z$  时株高、 $MGR$ 、 $LGR$ 、 $TLG$  对  $W$ ,以及  $W_{0.75}$  时  $MGR$ 、 $LGR$  对  $Z$  均存在正响应。 $Z_3$  时增加  $W$  以及  $W_{0.5}W_{0.75}$  时增加  $Z$  均会抑制  $t_1$ 、 $t_2$  和  $LGD$ 。 $W$ 、 $Z$  及其耦合效应对  $t_1$  及  $TLG$ 、 $t_2$ 、 $LGD$ 、 $MGR$  和  $LGR$  及株高影响分别表现为  $W>W\times Z>Z$ 、 $W\times Z>W>Z$ 、 $W\times Z>Z>W$ 、 $W>Z>W\times Z$ 。

**关键词:** Logistic 模型;番茄;水分;沸石量;番茄生长

中图分类号:S 641.2 文献标识码:A 文章编号:1001-0009(2022)16-0009-07

番茄含有丰富的抗氧化物和维生素,是世界上目前种植最广的蔬菜作物之一<sup>[1]</sup>。水分是影响植物生长发育、品质和产量形成的主要因子<sup>[2]</sup>。增加沸石可提高土壤保水性能<sup>[3]</sup>,进而可以减少水分胁迫对作物生长生理发育的影响<sup>[4]</sup>。因此,合理设置沸石改良剂与灌溉水量耦合策略,施用在番茄生长实践过程,将有望进一步挖掘农业深层节水潜力,推进水资源高效利用和番茄优质生长。

前人主要揭示了沸石量对番茄幼苗茎粗、叶面积、干物质量和壮苗指数<sup>[5]</sup>以及不同生长时期番茄植株生物量<sup>[6]</sup>、产量和品质<sup>[7-8]</sup>的影响,但对番茄全

生育期株高生长动力学特性的研究较少。水分对番茄全生育期产量<sup>[9-11]</sup>、株高和茎粗<sup>[11]</sup>、根系生长<sup>[12]</sup>、光合特性<sup>[13]</sup>、品质<sup>[10]</sup>和水分利用效率<sup>[9,11]</sup>等指标的研究较多,但水分和沸石量因素对番茄作用效果主次关系尚不明确。前人探究了常规滴灌水分和沸石量单因素效应对番茄株高物候期参数(线性生长起点  $t_1$ 、线性生长终点  $t_2$ 、线性生长期  $LGD$ )及生长期参数(最大线性生长速率  $MGR$ 、平均线性生长速率  $LGR$ 、线性生长量  $TLG$ )<sup>[14]</sup>、常规滴灌水分对番茄根系  $MGR$ <sup>[12]</sup>、盆栽交替灌溉水分对株高、茎粗和叶面积指数  $MGR$ <sup>[15]</sup>,以及水分对盆栽番茄地上部生物量  $t_1$ 、 $t_2$  及  $MGR$  的影响<sup>[16]</sup>。而膜下交替滴灌条件下水分、沸石及其耦合效应对番茄株高物候期及生长期参数影响尚不清楚。

该研究探究交替膜下滴灌水分-沸石耦合效应对番茄株高生长的影响,构建番茄株高生长动力学 Logistic 模型,探究水分-沸石及耦合效应对番茄物候期指标和生长期指标的影响,旨在为交替膜下滴灌条件下番茄种植提供参考依据。

**第一作者简介:**鞠晓兰(1997-),女,硕士研究生,研究方向为农业水肥资源高效利用。E-mail:1095455986@qq.com.

**责任作者:**雷涛(1990-),男,博士,副教授,硕士生导师,现主要从事农业水肥资源高效利用等研究工作。E-mail:lc-syt@126.com.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51909184, 51809189)。

**收稿日期:**2021-12-15

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在山西省水利水电科学研究院高效节水示范基地温室大棚内进行。该地平均海拔 763~780 m,属于暖温带大陆性气候,多年平均降水量约 468.4 mm,年平均蒸发量 1 812.7 mm,年平均气温 9.5℃。试验地土壤为黏壤土,饱和含水率  $0.44 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,田间持水率  $0.28 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验灌溉水源为基地内淡水井。

### 1.2 试验材料

供试番茄品种为“奥冠8号”。

### 1.3 试验方法

采用全面试验设计,水分设  $W_{0.5}$ 、 $W_{0.75}$ 、 $W_1$  (低、中、高)3个水平,分别为 50%、75%、100% 水面蒸发量;沸石量设  $Z_3$ 、 $Z_6$ 、 $Z_9$  (低、中、高)3个水平,分别为 3、6、9  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。共 9 个处理,每个处理 3 次重复。番茄采用覆膜起垄种植模式,垄长为 6 m,垄面宽为 0.8 m,高为 0.15 m,垄沟宽为 0.6 m,每垄定植 30 株番茄,行株距为 0.4 m×0.4 m。按照当地种植习惯,对所有小区进行相同田间管理。灌溉方式为交替灌溉,每垄铺设 2 条滴灌带,滴头间距 40 cm,工作流量为 1.2  $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,每 4 d 灌溉 1 次,每次灌水采用滴灌带单侧灌溉。番茄定植时间为 2020 年 6 月 4 日,结束时间为 10 月 7 日。各处理选取 3 株长势相近的番茄,采用精度为 1 mm 的卷尺对番茄茎基部到生长点的位置进行株高测定。

### 1.4 数据分析

采用 Logistic 模型式(1)对不同处理下番茄株高动态变化特征进行量化描述<sup>[17]</sup>。物候期参数式(2)~(4)和生长参数式(5)~(7)获取及计算方法参照雷涛等<sup>[14]</sup>研究报道。番茄株高 Logistic 量化模型建立由 Lstopt 8.0 软件完成。采用 Microsoft Office 2019 软件进行数据计算。采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行数据样本差异显著性等统计学分析,置信水平为 0.05。数据样本绘图由 Origin 2018 软件完成。

$$y = \frac{a}{1 + e^{-cx}} \quad (1),$$

$$t_1 = \frac{b - \ln(2 + \sqrt{3})}{c} \quad (2),$$

$$t_2 = \frac{b + \ln(2 + \sqrt{3})}{c} \quad (3),$$

$$LGD = t_2 - t_1 \quad (4),$$

$$MGR = \frac{1}{4}ac \quad (5),$$

$$LGR = \frac{ac}{2\sqrt{3}\ln(2 + \sqrt{3})} \quad (6),$$

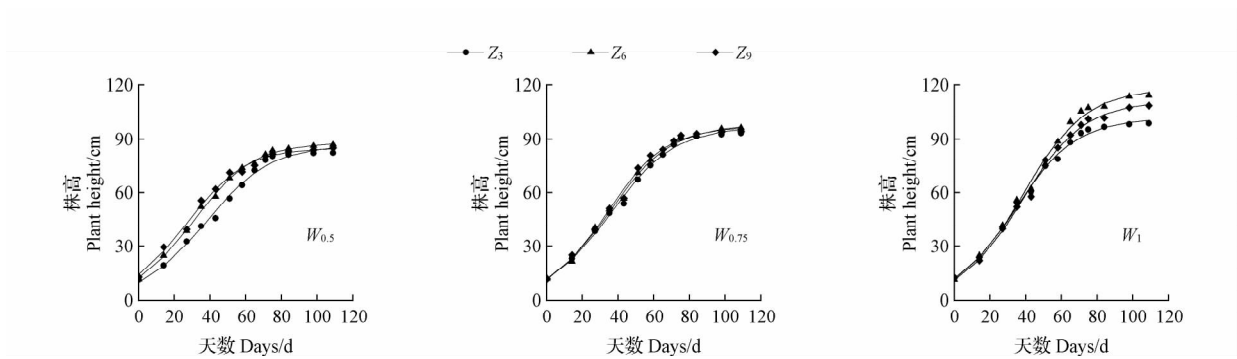
$$TLG = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (7)。$$

式中: $y$  为番茄株高,cm; $t$  为番茄定植后天数; $d$ ; $a$ 、 $b$  和  $c$  为模型系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分-沸石量处理下番茄生长特性

不同处理下番茄株高生长动态变化特征均表现为缓慢增长、快速线性增长、增速减缓并逐渐趋于稳定的 3 个阶段,整体趋势呈 S 型变化特征。不同处理下番茄株高样本实测值均匀分布在 Logistic 拟合曲线附近,说明株高预测值和实测值具有较好的一致性,采用 Logistic 模型进行番茄株高量化描述是合理可行的。由图 1 可知,在  $Z_3$ 、 $Z_6$  和  $Z_9$  条件下,当水分从  $W_{0.5}$  增加至  $W_1$  时,番茄株高分别单调递增 20.22%、31.30% 和 27.95%,说明水分增加对番茄株高生长存在促进效应,并且这种促进强度会随着沸石量增加表现为先增后减。在  $W_{0.5}$ 、 $W_{0.75}$  和  $W_1$  条件下,当沸石量由  $Z_3$  增加至  $Z_6$  时,番茄株高分别增加 5.85%、3.10% 和 15.60%;当沸石量由  $Z_6$  增加至  $Z_9$  时,番茄株高分别降低 2.42%、2.08% 和 4.91%。由此说明沸石量增加对番茄株高影响表现为先促后抑,且株高对沸石量响应趋势及强度受水分因素影响整体上相对较小。不同水分-沸石量处理下番茄株高大小表现为: $Z_6W_1 > Z_9W_1 > Z_3W_1 > Z_6W_{0.75} > Z_9W_{0.75} > Z_3W_{0.75} > Z_6W_{0.5} > Z_9W_{0.5} > Z_3W_{0.5}$ ,适宜番茄株高生长的水分沸石处理组合为  $Z_6W_1$ 。由表 1 可知,水分及沸石量单因素效应对株高存在极显著影响 ( $P < 0.01$ ),但双因素耦合效应对株高影响未达到显著水平。结合表 1 中Ⅲ类平方和计算结果可知,水分、沸石及其双因素耦合效应对番茄株高影响大小表现为: $W > Z > W \times Z$ 。



注：散点和线条表示番茄株高样本实测值和拟合值。

Note: Scattered points and lines represent the observed and fitted values of tomato plant height samples.

图 1 不同处理下番茄生长动力学过程

Fig. 1 Tomato growth kinetics process under different treatments

表 1 番茄株高双因素方差分析结果

Table 1 Results of two-way ANOVA of plant height for tomato

| 处理<br>Treatments | Ⅲ类平方和<br>Type III sum of squares | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F 值<br>F value | 显著性<br>Significance |
|------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| W                | 2 286.527                        | 2                        | 134.543           | 7.074          | <0.01               |
| Z                | 269.087                          | 2                        | 134.543           | 60.113         | <0.01               |
| W×Z              | 143.433                          | 4                        | 35.858            | 1.885          | 0.157               |

2.2 不同水分-沸石量处理下番茄生长阶段划分

根据 Logistic 模型特点及番茄物候期参数计算结果,将番茄生长过程划分为渐增期( $0 \sim t_1$ )、线性生长期( $t_1 \sim t_2$ )和缓增期( $t_2 \sim$ 生育期末)3 个阶段。由图 2 可知,番茄定植后  $0 \sim (4.64 \sim 15.34)$  d 处于渐增期,各处理番茄增长速率为  $0.56 \sim 1.19 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,均值为  $0.84 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,各

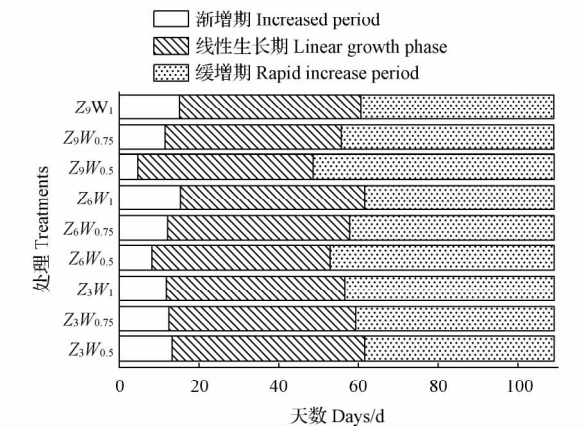


图 2 不同处理下番茄生长 3 个阶段划分

Fig. 2 Three growth stage of tomato under different treatments

处理番茄增长速率较为缓慢。定植后  $4.64 \sim 15.34$  d 番茄生长进入线性生长期阶段,各处理番茄增长速率为  $1.02 \sim 1.47 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,均值为  $1.23 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,该阶段苗株开始加速生长,单位时间内株高增幅比渐增期平均高出  $46.40\%$ 。定植后  $48.58 \sim 61.59$  d 达到线性生长期终点,整个线性生长期共持续  $43.94 \sim 48.32$  d。当线性增长期结束后,苗株紧接着进入缓增期( $(48.58 \sim 61.59) \sim 109$  d)。该阶段番茄增长速率为  $0.28 \sim 0.43 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,均值为  $0.35 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,生长速率较线性生长期减缓,并逐渐趋于稳定。

2.3 番茄物候期参数分析

由图 3 可知,在  $Z_3$  条件下,番茄  $t_1$ 、 $t_2$ 、LGD 随  $W$  增加分别单调递减  $10.84\%$ 、 $8.08\%$ 、 $7.32\%$ ;在  $Z_6$ 、 $Z_9$  条件下,番茄  $t_1$ 、 $t_2$ 、LGD 随  $W$  增加分别单调递增  $87.50\% \sim 225.43\%$ 、 $16.41\% \sim 24.80\%$ 、 $3.40\% \sim 3.62\%$ 。因此,中、高沸石量条件下  $W$  增加会延长番茄线性生长期起始和结束时间。在  $W_{0.5}$ 、 $W_{0.75}$  条件下,番茄  $t_1$ 、 $t_2$ 、LGD 随  $Z$  增加分别单调递减  $7.11\% \sim 64.94\%$ 、 $6.07\% \sim 21.08\%$ 、 $5.79\% \sim 9.07\%$ ,说明中、低水

分条件下  $Z$  增加对番茄物候期参数均有抑制作用;在高水分  $W_1$  条件下增加  $Z$  对番茄  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $LGD$  影响均表现为先促后抑。不同处理组合下  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $LGD$  对各因素响应强度不同,可能存在交互效应,有必要对数据样本进行双因素方差分析。由表 2 可知,水分、沸石及其耦合效应对  $t_1$ 、 $t_2$  存在极显著影响( $P < 0.01$ )。水分、双因素耦合效应对  $LGD$  影响均未达到显著水平,沸石量对  $LGD$  存在显著影响( $P < 0.05$ )。水分、沸石量及其耦合效应对番茄  $t_1$  影响表现为: $W > W \times Z > Z$ ,对番茄  $t_2$  影响表现为: $W \times Z > W > Z$ ,对  $LGD$  影响表现为: $W \times Z > Z > W$ 。

表 2 番茄物候期参数双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA for tomato phenological parameters

| 处理<br>Treatments | 因变量<br>Variable amount | Ⅲ类平方和<br>Type III sum of squares | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F 值<br>F-value | 显著性<br>Significance |
|------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| W                | $t_1$                  | 133.411                          | 2                        | 66.705            | 383.596        | $< 0.01$            |
|                  | $t_2$                  | 126.509                          | 2                        | 63.255            | 15.988         | $< 0.01$            |
|                  | $LGD$                  | 0.092                            | 2                        | 0.046             | 0.018          | 0.982               |
| Z                | $t_1$                  | 20.257                           | 2                        | 10.129            | 58.246         | $< 0.01$            |
|                  | $t_2$                  | 79.302                           | 2                        | 39.651            | 10.022         | $< 0.01$            |
|                  | $LGD$                  | 20.222                           | 2                        | 10.111            | 4.038          | $< 0.05$            |
| $W \times Z$     | $t_1$                  | 116.327                          | 4                        | 29.082            | 167.238        | $< 0.01$            |
|                  | $t_2$                  | 244.457                          | 4                        | 61.114            | 15.447         | $< 0.01$            |
|                  | $LGD$                  | 26.839                           | 4                        | 6.710             | 2.680          | 0.065               |

## 2.4 番茄生长参数分析

由图 4 可知,当水分由  $W_{0.5}$  增加至  $W_1$  时,番茄  $MGR$  和  $LGR$  可分别单调递增 25.99%~29.73%, $TLG$  单调递增 17.39%~34.15%,说明不同水分处理下  $MGR$ 、 $LGR$  和  $TLG$  大小均表现为: $W_1 > W_{0.75} > W_{0.5}$ ,增加  $W$  可促进番茄  $MGR$ 、 $LGR$  和  $TLG$ 。在  $W_{0.5}$  及  $W_1$  条件下沸石量由  $Z_3$  增加至  $Z_6$  时, $MGR$ 、 $LGR$  均分别增加 9.85%、12.52%, $TLG$  分别增加 1.68%、16.21%,再由  $Z_6$  增加至  $Z_9$  时,这一结果分别呈现为降低 1.66%~4.49%、1.66%~4.49%、3.39%~5.98%,说明在  $W_{0.5}$  及  $W_1$  条件下沸石量对番茄生长参数影响表现为先促后抑。在  $W_{0.75}$  条件下,增加  $Z$  可促使番茄  $MGR$  和  $LGR$  单调增加 6.74%,但  $TLG$  变化幅度不明显。不同水分-沸石量处理下番茄  $TLG$  介于 49.07~68.14 cm,占总生长量的 49.63%~69.15%,由此可见,线性生长期是影响番茄生长状况好坏的

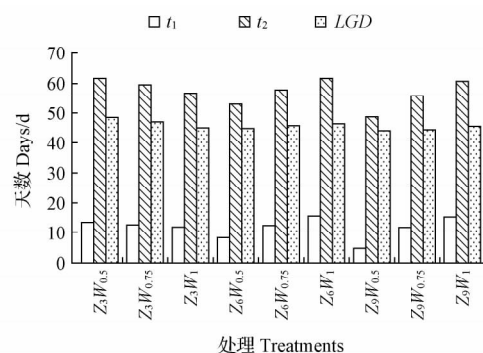


图 3 不同处理下番茄物候期参数

Fig. 3 Phenological parameters of tomato under different treatments

关键时期。为了进一步明确各因素及其耦合效应对番茄生长参数影响,对数据样本进行了双因素方差分析。由表 3 可知,水分、沸石量单因素效应均对  $MGR$ 、 $LGR$ 、 $TLG$  存在极显著( $P < 0.01$ )影响。水分与沸石量双因素耦合效应对  $MGR$ 、 $LGR$  影响均未达到显著水平,对  $TLG$  存在极显著

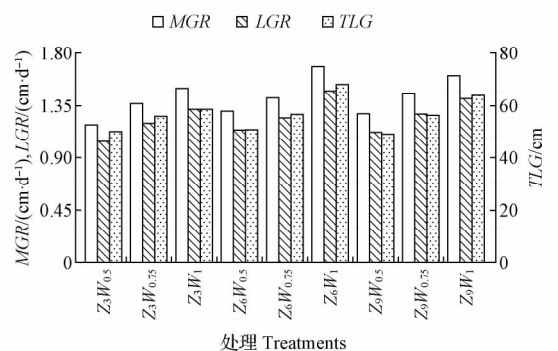


图 4 不同处理下番茄生长参数

Fig. 4 Tomato growth parameters under different treatments

表 3 番茄生长参数双因素方差分析

Table 3 Analysis of two-way ANOVA for tomato growth parameters

| 处理<br>Treatments | 因变量<br>Variable amount | Ⅲ类平方和<br>Type Ⅲ sum of squares | 自由度<br>Degree of freedom | 均方<br>Mean square | F 值<br>F value | 显著性<br>Significance |
|------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| W                | MGR                    | 0.532                          | 2                        | 0.266             | 108.77         | <0.01               |
|                  | LGR                    | 0.409                          | 2                        | 0.204             | 108.781        | <0.01               |
|                  | TLG                    | 843.084                        | 2                        | 421.542           | 108.037        | <0.01               |
| Z                | MGR                    | 0.074                          | 2                        | 0.037             | 15.043         | <0.01               |
|                  | LGR                    | 0.057                          | 2                        | 0.028             | 15.036         | <0.01               |
|                  | TLG                    | 60.950                         | 2                        | 30.475            | 7.811          | <0.01               |
| W×Z              | MGR                    | 0.015                          | 4                        | 0.004             | 1.555          | 0.229               |
|                  | LGR                    | 0.012                          | 4                        | 0.003             | 1.554          | 0.229               |
|                  | TLG                    | 80.548                         | 4                        | 20.137            | 5.161          | <0.01               |

( $P<0.01$ )影响。水分、沸石量及其耦合效应对番茄 MGR、LGR 影响均表现为： $W>Z>W\times Z$ ，对番茄 TLG 影响表现为： $W>W\times Z>Z$ 。

3 讨论

该研究结果表明水分增加对番茄株高、MGR、LGR 和 TLG 存在促进效应，这与雷涛等<sup>[14]</sup>、李欢欢等<sup>[18]</sup>的结论相似，这是由于当土壤水分越充足时，有助于加快根系吸水速率和提高水分吸收利用<sup>[19-20]</sup>，进而促进了番茄各项生长期参数和生长累积量。该研究还发现任意水分条件下增加沸石对株高以及高低水分条件下增加沸石对 MGR、LGR、TLG 影响均表现为先促后抑，这是由于沸石的多孔结构使其加入到土壤中后疏松土壤，改善土壤透气性，促进作物根系生长，通过提高水分吸收利用进而诱导番茄生长<sup>[21]</sup>。此外，沸石还能够提高土壤对水肥的固持能力<sup>[22]</sup>，由于沸石特殊的孔道结构，沸石如海绵一样，其内部水分可自由释放和重新吸收，而不破坏晶格结构，进而提高土壤保水能力，促进作物对水分吸收利用，加速作物生长<sup>[23]</sup>。但施入过量沸石将会导致沸石中大量钠离子侵入到土壤中从而毒害番茄根部，抑制番茄正常生长<sup>[24]</sup>。

该研究结果表明交替膜下滴灌不同水分-沸石耦合策略下番茄株高生长 3 个阶段分别占生育期 4.25%~14.07%、40.31%~44.33%、43.50%~55.43%。在前人报道中，滴灌条件不同水-肥-滴头间距处理下黄瓜株高生长 3 个阶段分别占生育期 23.25%、42.94%、33.81%<sup>[25]</sup>，滴灌条件不同残膜量处理下玉米株高生长 3 个阶段

比例分别为 21.32%~24.92%、37.73%~39.06%、37.35%~39.90%<sup>[26]</sup>。由此说明，在不同物候期研究报道中，线性生长期占比均较大，但生长阶段起始及持续时间会因水分条件、作物类型、灌溉调控方法等差异而略有不同，因此在农业生产管理过程中应充分遵循作物生长客观规律，因地制宜地加强作物线性生长期调控管理<sup>[27]</sup>，延长线性生长期，促进线性生长量，提高线性生长量占总生长量的百分率<sup>[28]</sup>，以达到作物优质生长目的。

在前人研究报道中的  $t_1$ 、 $t_2$  比该研究结果分别延迟 38.85%~368.60%、22.74%~28.86%<sup>[14]</sup>，这种差异可能是由基础试验条件不同所引起的番茄水分响应差异导致的。前人研究报道采用常规膜下滴灌，土壤质地为沙壤土，土壤含水率维持在 12.7%~30.4%<sup>[14]</sup>，该研究采用膜下交替滴灌，土壤质地为黏壤土，试验过程中观测的土壤含水率结果为 16.8%~33.7%。该研究中土壤含水率要高于前人研究报道，且土壤持水性能也优于前人研究报道，更充分的土壤水分将有助于加快番茄生长，提前线性生长期始末时间。相比较前人常规滴灌，该研究膜下交替滴灌能够刺激加强根系吸收补偿功能<sup>[29]</sup>，进而提高根系活力和水分利用效率<sup>[30]</sup>，从而促进番茄生长，这也是导致该研究与前人报道结果存在差异的原因。

4 结论

不同水分-沸石量耦合条件下番茄生长呈“慢-快-慢”S 型变化趋势，可采用 Logistic 模型进行量化描述。

不同水分-沸石量处理下番茄生长过程可划分为渐增期(0~(4.64~15.34)d)、线性生长期((4.64~15.34)~(48.58~61.59)d)、缓增期((48.58~61.59)~109 d)3个阶段。

任意  $W$  时株高、 $W_1$  时  $t_1$ 、 $t_2$  和  $LGD$ 、 $W_{0.75}$  时  $TLG$ 、以及  $W_{0.5}W_1$  时  $MGR$ 、 $LGR$ 、 $TLG$  随  $Z$  增加表现为先促后抑。 $Z_6Z_9$  时  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $LGD$  和任意  $Z$  时株高、 $MGR$ 、 $LGR$ 、 $TLG$  对  $W$ 、以及  $W_{0.75}$  时  $MGR$ 、 $LGR$  对  $Z$  均存在正响应。 $Z_3$  时增加  $W$  以及  $W_{0.5}W_{0.75}$  时增加  $Z$  均会抑制  $t_1$ 、 $t_2$  和  $LGD$ 。

$W$ 、 $Z$  及其耦合效应对  $t_1$  及  $TLG$ 、 $t_2$ 、 $LGD$ 、 $MGR$  和  $LGR$  及株高影响分别表现为： $W>W\times Z>Z$ 、 $W\times Z>W>Z$ 、 $W\times Z>Z>W$ 、 $W>Z>W\times Z$ 。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 余玲欢,樊怀福.水分亏缺对番茄生长、产量和果实品质的影响[J].中国瓜菜,2020,33(11):39-42.
- [3] SEPASKHAH A R, BARZEGAR M. Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semiarid environment[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1):38-44.
- [4] WANG Y S, LIU J, TANG S, et al. Modifications of chemically induced-nucleated nuclear transfer technique by reverse-order nuclear transfer in mouse[J]. Zygote, 2009, 17(3):261-268.
- [5] 宋秀华,王秀峰,臧金波,等.沸石添加对番茄幼苗素质的影响[J].中国蔬菜,2004(3):8-10.
- [6] 李鹏,安志装,赵同科,等.天然沸石对土壤镉及番茄生物量的影响[J].生态环境学报,2011,20(6):1147-1151.
- [7] 李鹏,安志装,赵同科,等.天然沸石对番茄及土壤中铅的影响[J].生态环境学报,2010,19(9):2219-2224.
- [8] 姬景红,李杰,李玉影,等.不同施肥措施对保护地番茄产量、品质及经济效益的影响[J].中国土壤与肥料,2012(5):35-39.
- [9] 郭艳波,冯浩,吴普特.西北地区不同土壤水分处理对温室大棚番茄产量和耗水的影响[J].自然资源学报,2009,24(1):50-57.
- [10] 罗勤,陈竹君,闫波,等.水肥减量对日光温室土壤水分状况及番茄产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):449-457.
- [11] 裴红霞,崔静英,赵云霞,等.不同土壤水分下限对沙培番茄生长发育及前期水分利用率的影响[J].甘肃农业大学学报,2017,52(6):39-43.
- [12] 杨再强,邱译萱,刘朝霞,等.土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J].生态学报,2016,36(3):748-757.
- [13] 史莹,周清,司哺春,等.持续高土壤水分对番茄植株叶绿素含量及光合特性的影响研究[J].北方园艺,2010(21):42-44.
- [14] 雷涛,郭向红,毕远杰,等.基于 Logistic 模型的番茄生长特性研究[J].节水灌溉,2020(10):10-14.
- [15] 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.
- [16] 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(5):1234-1242.
- [17] 曹玉鑫,曹红霞,王萍,等.营养液浓度对番茄生长、品质以及耐贮性的影响[J].食品科学,2018,39(7):63-70.
- [18] 李欢欢,刘浩,庞婕,等.水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):272-279.
- [19] 赵娣,王振华,李文昊,等.分根区交替灌溉对膜下滴灌加工番茄根系特征及产量的影响[J].核农学报,2018,32(10):2069-2079.
- [20] 梁博惠,牛文全,郭丽丽,等.滴灌灌水均匀系数对温室番茄生长的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):37-43.
- [21] 吕楠.由硅藻土合成丝光沸石及其酸洗研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [22] 祝春英.天然原料合成沸石分子筛对土壤改良的研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [23] 田艳飞,黄占斌,刘丹,等.纳米碳及其复合材料对油菜生长和土壤氮素保持效应的影响[J].环境科学学报,2016,36(9):3339-3345.
- [24] 马牡兰.控制性根系分区交替膜下滴灌对番茄耗水和产量的影响[J].内蒙古科技与经济,2019(18):86-87.
- [25] 王蓉,马玲,郭永婷,等.优化水肥与滴头间距组合对日光温室黄瓜生长及产量的影响[J].节水灌溉,2021(4):75-81.
- [26] 杜利,李援农,陈朋朋,等.不同残膜量对土壤环境及玉米生长发育的影响[J].节水灌溉,2018(7):4-9,14.
- [27] 何小勇,赵思东,袁德义,等.翅荚木苗期生长模型及其生长参数研究[J].江西农业大学学报,2008(1):81-85.
- [28] 杨志玲,杨旭,谭梓峰,等.厚朴不同种源苗期生长模型的拟合[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(4):60-68.
- [29] 康绍忠,潘英华,石培泽,等.控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J].水利学报,2001(11):80-86.
- [30] 董彦红,赵志成,张旭,等.分根交替滴灌对管栽黄瓜光合作用及水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):269-276.

## Effects of Moisture Content and Zeolite Amount on Tomato Growth Characteristics

JU Xiaolan, LEI Tao, GUO Xianghong, BI Yuanjie, LEI Zhen, LIU Ronghao

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024)

**Abstract:** Tomatoes under different water ( $W$ )-zeolite ( $Z$ ) coupling strategies of alternate drip irrigation under mulch were used as test materials, and the tomato growth dynamic process simulation method based on Logistic model was used to study the effects of  $W$ ,  $Z$  and their coupling effects on tomato phenological parameters (linear growth start point  $t_1$ , linear growth end point  $t_2$ , linear growth phase  $LGD$ ) and growth parameters (maximum linear growth rate  $MGR$ , average linear growth rate  $LGR$ , linear growth amount  $TLG$ ), in order to provide reference for tomato planting under the conditioned alternative film dropper. The results showed that under different  $W$ - $Z$  coupling conditions, tomato S-shaped growth process could be divided into gradually increasing stage, linear growing stage and slowly increasing stage, which was in accordance with Logistic model. Plant height at any  $W$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  and  $LGD$  at  $W_1$ ,  $TLG$  at  $W_{0.75}$ , and  $MGR$ ,  $LGR$ , and  $TLG$  at  $W_{0.5}$   $W_1$  increased firstly and then decreased with increasing  $Z$ . There were positive responses of  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $LGD$  to  $W$  at  $Z_6$   $Z_9$ , and plant height,  $MGR$ ,  $LGR$ ,  $TLG$  to  $W$  at any  $Z$ , and  $MGR$ ,  $LGR$  to  $Z$  at  $W_{0.75}$ . Increasing  $W$  at  $Z_3$  and increasing  $Z$  at  $W_{0.5}$   $W_{0.75}$  would inhibit  $t_1$ ,  $t_2$  and  $LGD$ . Effects of  $W$ ,  $Z$  and their coupling effects on  $t_1$  and  $TLG$ ,  $t_2$ ,  $LGD$ ,  $MGR$  and  $LGR$  and plant height were shown as follows,  $W > W \times Z > Z$ ,  $W \times Z > W > Z$ ,  $W \times Z > Z > W$ , and  $W > Z > W \times Z$ .

**Keywords:** Logistic model; tomato; moisture content; zeolite amount; tomato growth

## 本 刊 声 明

本刊最近接到部分作者反映,有冒充与本刊合作的网站骗取作者版面费的情况,为避免作者上当受骗,本刊郑重声明:本刊只接收网上投稿(投稿系统:www.haasep.cn);编辑部电话:0451-51522860;咨询邮箱:bffybjb@vip.163.com;本刊不以个人账号接收作者版面费。

《北方园艺》编辑部