

李宣志,张金珠,王振华,等.氮盐调控对膜下滴灌加工番茄光合特性及产量的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):186-194.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.021

## 氮盐调控对膜下滴灌加工番茄光合特性及产量的影响

李宣志,张金珠,王振华,刘健,梁洪榜

石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室/  
农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,石河子 832000

**摘要** 为了合理开发利用干旱地区微咸水资源,以加工番茄品种金番3166为试验材料,设置不同灌水矿化度1(S1)、3(S2)、5(S3) g/L和施氮量180(N1)、240(N2)、300(N3) kg/hm<sup>2</sup>处理,探究膜下滴灌条件下不同矿化度微咸水与施氮量协同调控对加工番茄光合特性及产量的影响。结果显示,在同一施氮量水平下,随着灌水矿化度的增加,加工番茄叶片的SPAD值、蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )、净光合速率(net photosynthetic rate,  $P_n$ )、气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ )和产量均逐渐减小,在成熟期叶片水分利用效率显著增大。在S1和S2水平下,施氮量增加(N3)显著提高叶片SPAD值、 $T_r$ 、 $P_n$ 和 $G_s$ ;在S3水平下,以N2处理的促进效果最好,且产量相较于N1水平分别提高11.46%、8.69%和5.17%。在N3处理下,S1和S2水平下加工番茄的产量无显著差异。综合考虑滴灌加工番茄的光合特性和产量变化,灌水矿化度为3 g/L、施氮量为300 kg/hm<sup>2</sup>时能促进加工番茄的光合作用并保证产量。

**关键词** 微咸水; 施氮量; 矿化度; 膜下滴灌; 加工番茄; 光合特性; 产量

**中图分类号** S641.2; S275.6    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2023)05-0186-09

水资源短缺已成为限制地区社会经济发展和农业生态环境改善的主要因素<sup>[1]</sup>。新疆位于西北内陆干旱区,年降水量小,蒸发量大,水资源严重匮乏且分布不均,农业生产用水占比更是达到总用水量的90%以上<sup>[2]</sup>,但新疆地下微咸水资源较为丰富,据统计矿化度大于3 g/L的微咸水资源约100亿m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>,开发利用微咸水进行农业灌溉也越来越受重视。科学合理地利用微咸水资源不仅能够缓解淡水资源短缺的问题,对于扩大农业生产水源和作物生境调控也有非常重要的作用<sup>[4]</sup>。新疆的加工番茄种植规模大,出口量多,是经济增长的支柱产业之一<sup>[5]</sup>,但加工番茄属于耐盐性较弱的植物<sup>[6]</sup>,膜下滴灌能够减少水分蒸发,使作物根区土壤形成脱盐区,有利于作物根区水分吸收<sup>[7]</sup>,是微咸水合理利用的灌溉方式。

众多学者研究表明,长期进行微咸水灌溉后会将盐分带入土壤,使根区土壤盐分含量增加<sup>[8]</sup>,引起土壤溶液渗透势增大,土壤-根系-叶片的水势梯度也发生变化,诱导叶片细胞膨压的改变,导致气孔导度、蒸腾作用和光合特性等一系列生理指标的变

化<sup>[9]</sup>。庞桂斌等<sup>[10]</sup>研究发现,使用3 g/L微咸水灌溉时,会导致冬小麦气孔导度和蒸腾速率下降,对净光合速率的影响却不显著。杨凤军等<sup>[11]</sup>研究表明,盐分胁迫会导致番茄的叶绿素含量、蒸腾效率和光合速率降低。氮肥作为植物生长发育过程中不可或缺的营养来源,对作物的产量也有着显著的影响。合理的氮肥施用可以缓解盐分胁迫对作物生长和产量的不利影响<sup>[12-13]</sup>。马韬等<sup>[14]</sup>研究表明,增施氮肥可减轻盐分胁迫效应,促进叶片生长和光能截获。Chen等<sup>[15]</sup>研究表明,在中低盐度时,增施氮肥可以促进棉花氮素吸收和生长,高盐度时并无显著影响。侯森等<sup>[16]</sup>研究得出,在进行微咸水灌溉时,充足的灌水量和氮肥供应能够显著提高棉花氮素吸收,促进生长。因此,在进行微咸水灌溉时,合理施用氮肥,确保作物生理生长以及提高产量,是农业生产有待解决的重要问题。

前人针对微咸水灌溉和氮肥施用对土壤盐分含量和作物的影响进行了大量研究,但目前微咸水滴灌与氮肥协同调控及其交互作用对作物的影响相关

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 新疆生产建设兵团科技创新团队项目(2019CB004); 新疆生产建设兵团节水灌溉试验计划项目(BTJSSY-202108)

李宣志, E-mail: 2229052588@qq.com

通信作者: 张金珠, E-mail: xjshzzjz@sina.cn

研究较少。本研究在膜下滴灌条件下探究不同灌水矿化度和施氮量对加工番茄光合特性和产量的影响,揭示其交互作用对加工番茄生理生长影响机制,以期为新疆干旱区微咸水资源合理开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2022年5—8月在新疆石河子市现代节水灌溉兵团重点实验室/石河子大学节水灌溉试验站( $86^{\circ}03'47''E$ ,  $44^{\circ}18'28''N$ , 海拔450 m)进行。该地区属于典型温带大陆性气候,年均日照时数2 950 h,年平均降水量220 mm,年平均蒸发量1 700 mm。试验田地下水埋深8 m以下,土壤质地为中壤土,小于0.01 mm粒径的土壤物理黏粒含量大于23%,0~60 cm土壤容重为 $1.45 \text{ g/cm}^3$ ,试验区

土壤理化性质见表1。

### 1.2 试验设计

试验加工番茄品种为金番3166,于2022年5月5日移苗定植,8月28日进入成熟期收获,全生育期115 d。种植模式为1膜2管4行,行距30 cm,株距35 cm。覆膜为宽145 cm的普通塑料地膜。试验小区内滴灌带间距0.70 m,滴头设计流量1.3 L/h,直径16 mm,滴头间距0.3 m。

参考当地生产实践及其他学者<sup>[17]</sup>研究,加工番茄全生育期灌溉定额为 $5\,200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。试验设置灌水矿化度和施氮量2个因素,设置3个灌水矿化度水平:1、3和5 g/L,分别以S1、S2和S3表示;设置3个施氮量水平:180、240和300 kg/hm<sup>2</sup>,分别以N1、N2和N3表示。完全随机组合共9个处理,每个处理重复3次,共27个试验小区,小区面积为22.5 m<sup>2</sup>(15 m×1.5 m),每个小区内种植加工番茄约180株。

表1 试验区土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil profiles in experimental plot

土层/cm Soil layer	田间持水率/(g/g) Field moisture capacity	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	pH
0~20	18.7	0.85	0.86	8.1	30.73	407.55	7.54
20~40	18.9	0.87	0.84	8.3	29.16	403.25	7.71
40~60	19.1	0.92	0.87	8.1	30.21	410.65	7.68

不同矿化度的微咸水由工业盐(NaCl含量>96%)配制而成。施肥采用尿素(N:46.4%)和磷酸二氢钾(K:28.72%,P:22.75%),磷酸二氢钾施用量为188 kg/hm<sup>2</sup>,试验小区的田间管理措施与当地保持一致。灌溉施肥制度如表2所示。

### 1.3 测定指标与方法

1)叶片SPAD值。在加工番茄的花期、果实膨大期和成熟期,每个处理选取3株长势均匀的植株,每个植株选取3片完全舒展的叶片进行测定,并取平

均值。使用便携式叶绿素仪SPAD-502 PLUS(Konica Minolta, Japan)测定SPAD(soil-plant analysis and development)值。

2)光合特性。在加工番茄的花期、果实膨大期和成熟期晴朗天气中选择某天,每个处理选取3株长势均匀的植株,对加工番茄的第4层向阳叶片进行红线标记。使用Li-6800型(Li-Cor)便携式光合测定仪测定加工番茄第4层向阳叶片的净光合速率 $P_n$ 、蒸腾速率 $T_r$ 、气孔导度 $G_s$ 、胞间CO<sub>2</sub>浓度 $C_i$ 等参数。测定

表2 加工番茄生育期灌溉施肥制度

Table 2 Irrigation schedule of processing tomato during the whole growth period

生育期 Growth period	日期(月/日) Date(Month/day)	持续时间/d Length of time	灌水、施肥周期/d Irrigation and fertilization cycle	灌水、施肥比例/% Ratio of irrigation and fertilization	灌水、施肥次数 Frequency of irrigation and fertilization
苗期 Seedling stage	05/05—05/31	26	30	14.3	1
花期 Flowering stage	06/01—06/20	20	20	14.3	1
果实膨大一期 Fruit enlargement stage I	06/21—07/15	25	12	14.3	2
果实膨大二期 Fruit enlargement stage II	07/16—08/04	20	10	14.3	2
成熟期 Maturity stage	08/05—08/28	24	11	14.3	1
全生育期 Whole growth stage		115		100	7

时开放气路,  $\text{CO}_2$ 流速为  $500 \mu\text{mol}/\text{s}$ , 观测时间均为上午 11:00—13:00。计算叶片水分利用效率(leaf water use efficiency, LWUE =  $P_n/T_r$ )<sup>[18]</sup>。

3)产量。在加工番茄成熟后, 每个小区选择 6 株长势均匀的植株进行测定, 以单株计, 包括单果质量、单株果数和单株产量。

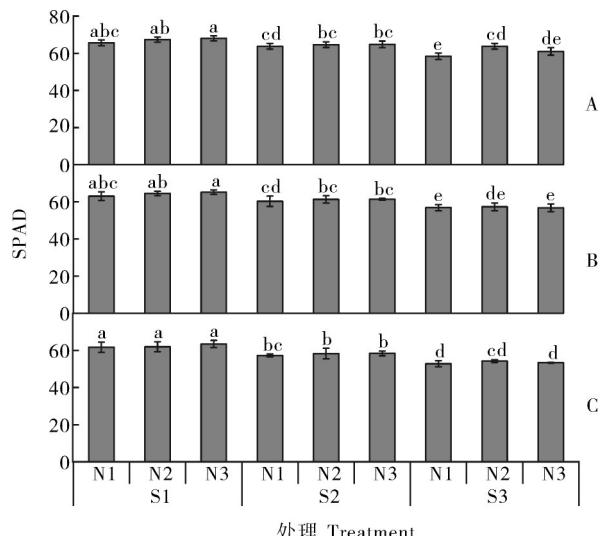
#### 1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2020 进行统计, 使用 Origin 2021b 进行绘图, SPSS Statistics 26 进行灌水矿化度和施氮量的双因素方差分析, Duncan's 法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 矿化度与施氮量对加工番茄 SPAD 值的影响

不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄不同生育期 SPAD 值的影响见图 1, 随着生育时期的推进, 不同处理加工番茄的 SPAD 值呈现降低的趋势, 在花期的 S1N3 处理下达到最大 68.03, 然后逐渐下降。矿化度对加工番茄各生育时期 SPAD 值的影响达到极显著水



A、B、C 分别表示加工番茄的花期、果实膨大期和成熟期。不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。A, B and C represent the flowering stage, fruit expansion stage and maturity stage of processing tomato, respectively. Different lowercase letters indicated significant differences among different treatments at the same growth period ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄不同生育期 SPAD 值的影响

Fig.1 Effects of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on SPAD values of processing tomato at different growth stages

平, 随着矿化度的增加, 叶片 SPAD 值呈逐渐下降趋势, 与 S1 处理相比, 各生育时期 S2、S3 处理 SPAD 值平均分别降低 3.88%、5.05%、7.05% 和 8.91%、11.28%、14.28%; 施氮量对加工番茄花期 SPAD 值的影响达到极显著水平, 随着施氮量的增加, 叶片 SPAD 值呈逐渐增加的趋势, 与 N1 处理相比, N2、N3 处理下平均分别增加 4.28% 和 3.23%; 矿化度与施氮量的交互作用对 SPAD 值没有显著影响(表 3)。这表明加工番茄的叶片 SPAD 值主要受矿化度的显著影响, 随着微咸水矿化度增加和加工番茄生育时期推进, 施氮量对叶片 SPAD 值的促进作用逐渐减小, 花期以后促进效果不显著, 以 N2 水平促进效果最好。

表 3 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄

不同生育期 SPAD 值的双因素方差分析

Table 3 Two-way analysis of variance between  
brackish water with different salinity and nitrogen  
application rate on SPAD values of processing  
tomato at different growth stages

因子 Factors	花期 Flowering stage	果实膨大期 Fruit expansion stage	成熟期 Maturity stage
S	30.864**	33.94**	49.476**
N	6.719**	0.897	0.903
S×N	1.955	0.252	0.294

注: \*\* 表示 0.01 水平上差异显著, 下同。 Note: \*\* indicate significant at 0.01 level. The same as below.

### 2.2 矿化度与施氮量对加工番茄光合特性的影响

由表 4 分析可知, 在加工番茄的花期, 矿化度对蒸腾速率、净光合速率和气孔导度的影响均达到极显著水平, 总体表现为随着矿化度的增加均逐渐减小。与 S1 处理相比, S2、S3 处理下蒸腾速率、净光合速率和气孔导度分别下降 6.74%、7.73%、23.20% 和 26.90%、19.32%、38.57%。施氮量对气孔导度的影响达到极显著水平, 在 S1、S2 水平下, 随着施氮量的增加逐渐增大; 在 S3 水平下, 随着施氮量的增加先增大后减小。与 N1 处理相比, N2、N3 处理下气孔导度分别增加 21.01% 和 26.17%。矿化度与施氮量的交互作用对胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响显著, S3N3 处理下达到最高, 说明随着矿化度和施氮量的逐渐增加, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度会产生显著积累。不同处理的叶片水分利用效率在花期随矿化度的增加略有增加, 但并不显著。

表4 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄花期光合特性的影响  
**Table 4 Effects of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of processing tomato at flowering stage**

处理 Treatment	蒸腾速率/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Transpiration rate ( $T_r$ )	净光合速率/ [μmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Net photosynthetic rate ( $P_n$ )	气孔导度/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Stomatal conductance ( $G_s$ )	胞间CO <sub>2</sub> 浓度/ (μmo/mol) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration ( $C_i$ )	叶片水分利用效率/ (μmol/mmol)Leaf water use efficiency (LWUE)
S1N1	6.7±0.61ab	18.66±1.08ab	191.64±40.86bc	224.49±15.46a	2.79±0.15a
S1N2	7.35±1.20ab	19.53±2.10a	234.91±29.1ab	222.01±6.30ab	2.73±0.68a
S1N3	7.87±0.46a	20.07±0.46a	245.98±30.44a	204.23±8.69b	2.56±0.2a
S2N1	6.27±0.64abc	17.45±0.89abc	147.19±35.55cd	217.00±6.95ab	2.81±0.41a
S2N2	6.99±1.25ab	17.60±2.04abc	178.08±12.80c	225.84±12.33a	2.54±0.20a
S2N3	7.17±0.80ab	18.70±0.93ab	191.25±1.99bc	220.88±6.51ab	2.62±0.24a
S3N1	4.58±0.57c	15.03±0.70c	122.59±13.46d	223.35±4.13ab	3.32±0.52a
S3N2	5.87±1.63abc	16.18±1.87bc	145.54±18.38cd	216.99±12.05ab	2.93±0.93a
S3N3	5.57±1.01bc	15.79±2.34c	144.97±19.43cd	234.29±14.47a	2.86±0.21a
方差分析 Analysis of variance					
S	9.846**	15.473**	26.595**	1.329	1.78
N	2.882	1.44	6.387**	0.092	1.03
S×N	0.164	0.229	0.332	2.996*	0.155

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), S为不同灌水矿化度处理, N为不同施氮量处理,\*和\*\*分别代表在0.05和0.01水平上差异显著。下同。Note: After data in the same column, different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ), S refers to treatments with different irrigation salinity, N refers to treatments with different nitrogen application rates, \* and \*\* represent significant differences at 0.05 and 0.01 levels respectively. The same as below.

由表5可见,在加工番茄的果实膨大期,矿化度对蒸腾速率、净光合速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响均达到极显著水平,总体表现为随着矿化度的增加,蒸腾速率、净光合速率和气孔导度均逐渐减小,胞间CO<sub>2</sub>浓度逐渐增大。与S1处理相比,S2、S3处理下蒸腾速率、净光合速率和气孔导度平均分别下降9.84%、5.96%、9.65%和29.16%、23.45%、18.41%,胞间CO<sub>2</sub>浓度平均分别增加25.08%和38.34%。施氮量对蒸腾速率、净光合速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响达到显著水平,在S1、S2水平下,蒸腾速率和净光合速率随着施氮量的增加均逐渐增大,胞间CO<sub>2</sub>浓度逐渐减小;在S3水平下,蒸腾速率和净光合速率随着施氮量的增加均先增大后减小,胞间CO<sub>2</sub>浓度则先减小后增大。与N1处理相比,N2、N3处理下蒸腾速率和净光合速率平均分别增加19.63%、15.25%和24.81%、15.95%,胞间CO<sub>2</sub>浓度平均下降20.37%和19.33%。矿化度与施氮量的交互作用对胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响达到显著水平,与花期相同,在S3N3处理下达到最高。不同处理的叶片水分利用效率与花期一致,并无显著差异。

由表6分析可得,在加工番茄的成熟期,矿化度对蒸腾速率、净光合速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度

和叶片水分利用效率的影响均达到显著水平,总体表现为随着矿化度的增加,蒸腾速率、净光合速率和气孔导度均逐渐减小,胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片水分利用效率逐渐增大。与S1处理相比,S2、S3处理下蒸腾速率、净光合速率和气孔导度平均分别下降31.21%、16.44%、41.80%和49%、28.25%、50.50%,胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片水分利用效率平均分别增加0.58%、21.96%和6.94%、42.34%。施氮量对蒸腾速率、净光合速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片水分利用效率的影响达到显著水平,在不同的矿化度水平下,蒸腾速率呈现出不同的变化趋势;胞间CO<sub>2</sub>浓度均随着施氮量的增加而减小;在S1、S2水平下,随着施氮量的增加,净光合速率和叶片水分利用效率逐渐增大,在S3水平下,则呈现出先增大后减小的趋势。与N1处理相比,N2、N3处理下胞间CO<sub>2</sub>浓度平均分别下降4.94%和17.71%,净光合速率和叶片水分利用效率分别增加6.13%、10.52%和7.41%、15.39%。矿化度与施氮量的交互作用对蒸腾速率、净光合速率和叶片水分利用效率的影响均达到极显著水平,叶片水分利用效率在S3N2处理下达到最高,说明高矿化度时,适量施氮能够得到较高的叶片水分利用效率。

表5 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄果实膨大期光合特性的影响  
**Table 5 Effects of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of processing tomato at fruit expansion stage**

处理 Treatment	蒸腾速率/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Transpiration rate ( $T_r$ )	净光合速率/ [μmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Net photosynthetic rate ( $P_n$ )	气孔导度/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Stomatal conductance ( $G_s$ )	胞间CO <sub>2</sub> 浓度/ (μmol/mol) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration ( $C_i$ )	叶片水分利用效率/ (μmol/mmol) Leaf water use efficiency (LWUE)
S1N1	8.29±1.29bc	21.03±2.55bcd	385.13±51.14ab	148.89±22.53bc	2.55±0.10a
S1N2	9.61±0.83ab	24.20±1.86ab	386.13±50.73ab	101.93±19.90e	2.52±0.08a
S1N3	10.28±0.27a	25.58±0.47a	438.12±24.28a	95.00±12.29e	2.49±0.07a
S2N1	7.25±1.04c	20.13±1.27bcd	355.02±45.00bc	172.54±14.09ab	2.80±0.25a
S2N2	8.75±0.37b	22.99±3.47abc	357.39±45.65bc	149.32±3.36bc	2.62±0.31a
S2N3	9.41±0.8ab	23.47±3.97abc	380.27±32.48abc	110.69±19.93de	2.49±0.27a
S3N1	5.82±0.25d	16.69±2.30d	327.09±35.39bc	161.37±19.03abc	2.87±0.35a
S3N2	7.18±0.32c	19.49±0.80cd	354.31±29.08bc	133.22±20.73cd	2.72±0.24a
S3N3	6.97±0.87cd	18.03±1.47d	305.32±41.03c	183.8±14.33a	2.61±0.35a
方差分析 Analysis of variance					
S	30.34**	14.07 **	7.58 **	15.34 **	1.71
N	13.57**	5.13 *	0.49	10.38 **	1.65
S×N	0.49	0.45	1.33	7.39 **	0.23

表6 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄成熟期光合特性的影响  
**Table 6 Effects of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of processing tomato at maturity stage**

处理 Treatment	蒸腾速率/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Transpiration rate ( $T_r$ )	净光合速率/ [μmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Net photosynthetic rate ( $P_n$ )	气孔导度/ [mmol/(m <sup>2</sup> ·s)] Stomatal conductance ( $G_s$ )	胞间CO <sub>2</sub> 浓度/ (μmol/mol) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration ( $C_i$ )	叶片水分利用效率/ (μmol/mmol) Leaf water use efficiency (LWUE)
S1N1	5.07±0.07b	21.07±0.73b	433.26±16.77a	261.3±13.48ab	4.15±0.20d
S1N2	5.28±0.04a	22.25±0.58a	436.82±24.02a	256.09±10.88ab	4.22±0.08d
S1N3	5.42±0.04a	23.20±0.93a	465.06±55.18a	205.48±21.15c	4.28±0.16d
S2N1	3.63±0.15c	17.52±0.32de	244.45±15.81bc	267.27±1.33ab	4.83±0.17c
S2N2	3.82±0.07c	18.47±0.34d	273.43±29.77b	250.56±18.34ab	4.84±0.02c
S2N3	3.40±0.01d	19.59±1.13c	259.17±38.88bc	209.22±0.85c	5.76±0.34b
S3N1	3.02±0.01e	15.57±0.45f	215.83±43.13bc	272.92±7.07a	5.16±0.14c
S3N2	2.57±0.28f	16.76±0.18e	240.13±35.61bc	255.27±7.14ab	6.57±0.77a
S3N3	2.45±0.04f	15.39±0.28f	204.92±3.44c	244.88±16.29b	6.28±0.04ab
方差分析 Analysis of variance					
S	1 215.978**	227.168**	120.663**	4.807*	77.812**
N	4.679*	11.752**	0.766	33.238**	13.381**
S×N	17.018**	4.678**	0.785	2.389	7.092**

综上,随着生育进程的推进,加工番茄的蒸腾速率和净光合速率呈先增大后减小的趋势,胞间CO<sub>2</sub>浓度则呈先减小后增大的趋势,在成熟期叶片水分利用效率显著升高,施氮量和矿化度与施氮量的交互作用对蒸腾速率、净光合速率和叶片水分利用效率也达到极显著影响。矿化度为S3水平时,对加工番茄光合特性产生的抑制作用最大,此时适宜的施氮量(N2)能够改善高矿化度灌水带来的负

作用。

### 2.3 矿化度与施氮量对加工番茄产量的影响

由表7可得,不同矿化度对加工番茄单株果数、单果质量和产量的影响均达到极显著水平。随着灌水矿化度的增加,单株果数、单果质量和产量呈逐渐减小的趋势,与S1处理相比,S2处理下单株果数平均增加1.79%,单果质量和产量平均降低4.97%和3.33%,S3处理下平均分别降低7.16%、10.00%、

**表7 不同矿化度微咸水与施氮量对加工番茄产量的影响**  
**Table 7 Effect of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on yield of processing tomato**

处理 Treatment	单株果数 Fruit number per plant	单果质量/g Weight of single fruit	产量/(t/hm <sup>2</sup> ) Yield
S1N1	48.67±2.08abcd	41.21±0.98abcd	160.53±9.94abc
S1N2	50.00±2.65ab	43.16±1.26ab	172.80±13.95ab
S1N3	50.33±2.52ab	44.44±1.54a	178.93±10.86a
S2N1	49.67±2.08abc	39.45±2.56bcd	156.53±7.26bc
S2N2	51.33±1.15a	41.03±2.62abcd	168.53±12.04ab
S2N3	50.67±2.52ab	41.92±1.88abc	170.13±15.14ab
S3N1	45.33±2.08d	37.77±2.12d	136.80±5.6d
S3N2	47.00±1.00abc	38.71±0.67cd	145.60±5.6cd
S3N3	46.00±2.00cd	39.44±3.43bcd	144.80±6.93cd
方差分析 Analysis of variance			
S	11.487**	9.672**	19.209**
N	1.333	3.211	4.334*
S×N	0.09	0.108	0.205

16.61%。施氮量对加工番茄产量的影响达到显著水平,随着施氮量的增加,产量呈逐渐增加的趋势,与N1处理相比,N2、N3处理平均分别增加7.29%和8.81%。矿化度与施氮量的交互作用对单株果数、单果质量和产量的影响并不显著。表明在不同矿化度处理下,增加施氮量可以提高加工番茄的产量,但在高矿化度时,增加施氮量对产量的促进作用逐渐减小。

### 3 讨 论

植物的光合特性对于其整个生长发育过程来说至关重要,微咸水灌溉后,土壤中可溶性盐积累,会出现土壤水分有效性降低、植物叶绿体受到破坏、叶绿素酶活性改变等不良影响<sup>[19-21]</sup>,从而引起植株的气孔导度、蒸腾速率、净光合速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度发生变化,最终对产量造成不利影响<sup>[22]</sup>。

叶绿素是影响光合特性的重要生理指标,叶片SPAD值可以反映叶绿素的相对含量<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,随着灌水矿化度的增加,加工番茄叶片SPAD值逐渐减小,并随着生育时期的推进减幅变大。范方等<sup>[24]</sup>研究表明,盐胁迫下紫花苜蓿叶片SPAD值总体呈下降趋势,并随着盐胁迫强度的增加而下降。侯鹏浩等<sup>[25]</sup>研究发现,随着盐溶液浓度的增加,大豆叶片SPAD值呈下降趋势,且当盐浓度达100 mmol/L以上时,叶片SPAD值显著下降。张潭等<sup>[26]</sup>研究同样得出,当盐浓度大于100 mmol/L后,

枸杞叶片SPAD值显著降低。这是由于高矿化度水灌溉导致了更多的土壤盐分积累,使植物细胞遭受更强的胁迫,使叶绿体酶活性增大,加速了叶绿素的分解<sup>[27]</sup>,引起SPAD值的下降。

本研究中,在1 g/L和3 g/L微咸水处理下,随着施氮量的增加,加工番茄叶T<sub>r</sub>和P<sub>n</sub>随之增大,并使其保持在较高的水平;而在5 g/L微咸水处理下,随着施氮量的增加,对加工番茄叶片T<sub>r</sub>和P<sub>n</sub>的促进作用先增大后减小,且T<sub>r</sub>和P<sub>n</sub>仍然会显著减小。这表明氮肥在一定范围内能够调节和改善非气孔因素对P<sub>n</sub>带来的不良影响<sup>[28]</sup>。不同矿化度微咸水下加工番茄叶片的光合作用主要受到非气孔因素的影响,C<sub>i</sub>的变化情况可以作为判断光合速率变化是气孔或非气孔因素的依据<sup>[29]</sup>。根据Farquhar等<sup>[30]</sup>研究结果,植物P<sub>n</sub>的变化主要通过比较C<sub>i</sub>和G<sub>s</sub>的变化情况来确定:当C<sub>i</sub>和G<sub>s</sub>同时降低时为气孔限制,当G<sub>s</sub>降低而C<sub>i</sub>并没有出现减小趋势则为非气孔限制。本研究中,在加工番茄的不同生育时期,随着灌水矿化度的增加,P<sub>n</sub>呈现逐渐下降的趋势,G<sub>s</sub>也随之下降,而C<sub>i</sub>的变化从花期的无显著变化到果实膨大期和成熟期的逐渐增大,是因为由非气孔限制引起的光合作用减小,致使P<sub>n</sub>降低。分析其原因是高盐胁迫下,可溶性盐含量增加,植株体内积累大量盐离子,使叶绿体结构受到破坏,叶绿素含量降低,光合系统受到破坏,从而导致光合速率下降<sup>[31]</sup>。在加工番茄的果实膨大期和成熟期,随着灌水矿化度的增加,T<sub>r</sub>均显著减小,LWUE在成熟期显著提高,与Hnilickova等<sup>[32]</sup>和田德龙等<sup>[33]</sup>研究中得出的结果类似。

随着灌水矿化度的增加,加工番茄的产量整体上呈现逐渐下降的趋势<sup>[34]</sup>。本研究中,在3 g/L微咸水处理下,对产量影响较小,施氮量为300 kg/hm<sup>2</sup>时产量达到最大,在5 g/L微咸水处理下,产量出现显著下降,施氮量为240 kg/hm<sup>2</sup>时产量达到最大,与张继峯等<sup>[35]</sup>研究结果相似。说明通过控制施氮量可以使加工番茄的产量不同程度提高,从而改善盐分胁迫对产量造成的不良影响。从产量构成来看,高矿化度条件下加工番茄单果质量的降幅大于单株果数,表明高矿化度时主要通过减小加工番茄的单果质量而导致产量的降低。此外,在长期进行微咸水灌溉时,还应该考虑到灌水量和作物耕层盐分积累的问题,这也会对加工番茄的生长及产量造成影响,仍需开展长期的微咸水灌溉试验进一步探究。

本研究结果表明,在灌水矿化度为3 g/L、施氮

量为300 kg/hm<sup>2</sup>时能促进加工番茄的蒸腾速率和净光合速率提升并保证产量。在灌水矿化度与施氮量协同调控下,灌水矿化度对加工番茄光合特性参数及产量的影响作用强于施氮量,增加施氮量能够缓解微咸水灌溉带来的负面影响。

## 参考文献 References

- [1] 张振龙,孙慧,苏洋.新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测[J].环境科学研究,2017,30(12):1880-1888.ZHANG Z L, SUN H, SU Y. Dynamic characteristics and prediction of ecological footprint and carrying capacity of water resources in arid areas of Xinjiang[J]. Research of environmental sciences, 2017, 30 (12) : 1880-1888 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李倩文,左其亭,李东林,等.新疆水资源开发利用的空间均衡分析[J].水资源保护,2021,37(2):28-33.LI Q W,ZUO Q T, LI D L, et al. Spatial equilibrium analysis of water resources development and utilization in Xinjiang [J]. Water resources protection, 2021, 37 (2) : 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王琼,尹飞虎,何帅,等.新疆咸水资源现状及其利用分析[J].绿洲农业科学与工程,2018(3):55-60.WANG Q, YIN F H, HE S, et al. Analysis of present situation and utilization of saline water resource in Xinjiang[J]. Oasis agriculture science and engineering, 2018(3):55-60 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.WANG Q J, SHAN Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (12) : 117-126 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈兵.中国新疆番茄产业发展现状分析[J].新疆财经大学学报,2011(3):16-20.CHEN B. An analysis on current status of tomato industry in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University of Finance & Economics, 2011 (3) : 16-20 (in Chinese with English abstract).
- [6] 马中昇,谭军利,魏童.中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J].灌溉排水学报,2019,38(3):70-75.MA Z S, TAN J L, WEI T. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China [J]. Journal of irrigation and drainage, 2019, 38(3):70-75 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 F Q, WEN J, HU H C, 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 with English abstract).
- [8] 杨文杰,王振华,任作利,等.微咸水膜下滴灌对土壤水盐分布及加工番茄产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):117-123,131.YANG W J, WANG Z H, REN Z L, et al. Effects of drip irrigation under brackish water mulch on soil water and salt distribution and processing tomato yield [J]. Agricultural research in the arid areas, 2019, 37(6):117-123, 131 (in Chinese with English abstract).
- [9] BEN-ASHER J, TSUYUKI I, BRAVDO B A, et al. Irrigation of grapevines with saline water [J]. Agricultural water management, 2006, 83(1/2):13-21.
- [10] 庞桂斌,徐征和,王海霞,等.微咸水灌溉对冬小麦光合特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(1):35-41.PANG G B, XU Z H, WANG H X, et al. Effect of irrigation with slight saline water on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of irrigation and drainage, 2018, 37 (1):35-41 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨凤军,李天来,臧忠婧,等.等渗NaCl、干旱胁迫对番茄幼苗光合特性及叶绿体超微结构的影响[J].应用生态学报,2017,28(8):2588-2596.YANG F J, LI T L, ZANG Z J, et al. Effects of isotonic NaCl and drought stress on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of tomato seedlings [J]. Chinese journal of applied ecology, 2017, 28 (8) : 2588-2596 (in Chinese with English abstract).
- [12] ALBASSAM B A. Effect of nitrate nutrition on growth and nitrogen assimilation of pearl millet exposed to sodium chloride stress[J]. Journal of plant nutrition, 2001, 24(9):1325-1335.
- [13] FLORES P, CARVAJAL M, CERDÁ A, et al. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites [J]. Journal of plant nutrition, 2001, 24(10):1561-1573.
- [14] 马韬,曾文治,伍靖伟,等.不同施氮量下盐渍农田向日葵冠层生长与辐射利用规律[J].农业机械学报,2020,51(12):292-303.MA T, ZENG W Z, WU J W, et al. Sunflower canopy development, radiation absorption and use efficiency at different nitrogen application rates in saline fields [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51 (12) : 292-303 (in Chinese with English abstract).
- [15] CHEN W P, HOU Z N, WU L S, et al. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment [J]. Plant and soil, 2010, 326(1):61-73.
- [16] 侯森,侯振安,治军,等.咸水滴灌条件下棉花生长和氮素吸收对水氮的响应[J].新疆农业科学,2010,47(9):1882-1887.HOU S, HOU Z A, YE J, et al. Cotton growth and nitrogen uptake in response to rates of water and nitrogen under drip irrigation with saline water[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47 (9) : 1882-1887 (in Chinese with English abstract).
- [17] 窦允清,王振华,侯裕生,等.模糊数学综合评判分析北疆加工番茄水氮耦合效应[J].核农学报,2020,34(9):2059-2070.DOU Y Q, WANG Z H, HOU Y S, et al. Analysis of water-nitrogen coupling effect of processing tomatoes in Northern

- Xinjiang by fuzzy mathematics comprehensive evaluation [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2020, 34 (9) : 2059-2070 (in Chinese with English abstract).
- [18] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35 (9): 2902-2909.YU W Y, JI R P, FENG R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage [J]. Acta ecologica sinica, 2015, 35 (9) : 2902-2909 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨劲松. 作物对不同盐胁迫和调控条件的响应特征与抗盐性调控研究[D]. 南京:南京农业大学, 2006.YANG J S. Characteristics of crop response on different salt stress/management and the regulation of crop salt resistance[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨晓慧, 蒋卫杰, 魏珉, 等. 植物对盐胁迫的反应及其抗盐机理研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, 37 (2) : 302-305, 308.YANG X H, JIANG W J, WEI M, et al. Review on plant response and resistance mechanism to salt stress[J]. Journal of Shandong Agricultural University(natural science edition), 2006, 37(2):302-305,308 (in Chinese).
- [21] 王加真, 夏更寿, 李建龙, 等. 高盐胁迫对沟叶结缕草叶片光合色素含量的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2007, 25(6): 583-586.WANG J Z, XIA G S, LI J L, et al. Effects of NaCl stress on the content of photosynthetic pigments in the leaves of zoysiagrass [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (agricultural science), 2007, 25 (6) : 583-586 (in Chinese with English abstract).
- [22] 庞桂斌, 张立志, 王通, 等. 微咸水灌溉作物生理生态响应与调节机制研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2016, 30(4) : 250-255.PANG G B, ZHANG L Z, WANG T, et al. Review on plant physiological and growth responses and regulation mechanisms under slight saline water irrigation[J]. Journal of University of Jinan (science and technology), 2016, 30 (4):250-255 (in Chinese with English abstract).
- [23] LIN F F, QIU L F, DENG J S, et al. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status [J]. Computers and electronics in agriculture, 2010, 71:S60-S65.
- [24] 范方, 张玉霞, 姜健, 等. 盐胁迫对紫花苜蓿生长及光合生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17):14-18.FAN F, ZHANG Y X, JIANG J, et al. Effects of salt stress on the growth and photosynthetic physiological characteristics of alfalfa [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2013, 29 (17) : 14-18 (in Chinese with English abstract).
- [25] 侯鹏浩, 杨万明, 杜维俊, 等. 不同程度盐胁迫对大豆苗期生物量及生理指标的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(3):422-430. HOU P H, YANG W M, DU W J, et al. Effects of different degree salt stress on biomass and physiological indexes of soybean seedling [J]. Soybean science, 2020, 39(3) : 422-430 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张潭, 唐达, 李思思, 等. 盐碱胁迫对枸杞幼苗生物量积累和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(12) : 2474-2482.ZHANG T, TANG D, LI S S, et al. Responses of growth and photosynthesis of *Lycium barbarum* L. seedling to salt-stress and alkali-stress [J]. Acta botanica boreali-occidentalis sinica, 2017 , 37 ( 12 ) : 2474-2482 (in Chinese with English abstract ).
- [27] 马巧利, 孙彦, 杨青川, 等. NaCl 和等渗 PEG4000 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及生理活性的影响[J]. 草地学报, 2012, 20 (3) : 547-552.MA Q L, SUN Y, YANG Q C, et al. Influence of NaCl and osmotic PEG4000 stress on seed germination of *Medicago sativa* [J]. Acta agrestia sinica, 2012, 20(3):547-552 (in Chinese with English abstract ).
- [28] 王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 等. 不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39 (1) : 99-106. WANG H B, ZHANG S T, JIAO Y P, et al. Effect of brackish water sprinkling irrigation with different nitrogen and salinity levels on photosynthesis characteristics and yield of winter wheat [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2022, 39(1):99-106 (in Chinese with English abstract ).
- [29] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO<sub>2</sub> 浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (7) : 76-80.XU J Z, PENG S Z, WEI Z, et al. Intercellular CO<sub>2</sub> concentration and stomatal or non-stomatal limitation of rice under water saving irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26 (7) : 76-80 (in Chinese with English abstract ).
- [30] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual review of plant physiology, 1982, 33:317-345.
- [31] 吴家富, 杨博文, 向珣朝, 等. 不同水稻种质在不同生育期耐盐鉴定的差异[J]. 植物学报, 2017, 52 (1) : 77-88. WU J F, YANG B W, XIANG X C, et al. Identification of salt tolerance in different rice germplasm at different growth stages [ J ]. Chinese bulletin of botany, 2017, 52 (1) : 77-88 (in Chinese with English abstract ).
- [32] HNILIČKOVÁ H, HNILIČKA F, MARTINKOVÁ J, et al. Effects of salt stress on water status, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of rocket [J]. Plant, soil and environment, 2017, 63(8) : 362-367.
- [33] 田德龙, 史海滨, 闫建文, 等. 盐分胁迫下水、肥对向日葵光合特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5):73-77. TIAN D L, SHI H B, YAN J W, et al. Effects of water and fertilizer on sunflower photosynthetic characteristics under the salt stress [ J ]. Journal of irrigation and drainage, 2012, 31 ( 5 ) : 73-77 (in Chinese with English abstract ).
- [34] 姚玉涛, 张国新, 孙叶炼, 等. 微咸水灌溉对设施番茄生

- 长以及产量和品质的影响[J].河北农业科学,2021,25(1):48-53.YAO Y T,ZHANG G X,SUN Y S,et al.Effects of brackish water irrigation on growth,yield and quality of tomato in facility[J].Journal of Hebei agricultural sciences,2021,25(1):48-53(in Chinese with English abstract).
- [35] 张继峯,王振华,张金珠,等.滴灌下氮盐交互对加工番茄荧光特性及产量品质的影响[J].中国农业科学,2020,53(5):990-1003.ZHANG J F,WANG Z H,ZHANG J Z,et al.The influences of different nitrogen and salt levels interactions on fluorescence characteristics,yield and quality of processed tomato under drip irrigation[J].Scientia agricultura sinica,2020,53(5):990-1003(in Chinese with English abstract).

## Effects of regulating nitrogen and salt on photosynthetic characteristics and yield of processing tomatoes under mulched drip irrigation

LI Xuanzhi,ZHANG Jinzhu,WANG Zhenhua,LIU Jian,LIANG Hongbang

College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University/  
Xinjiang Production & Construction Group Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation/  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Northwest Oasis Water Saving  
Agriculture, Shihezi 832000, China

**Abstract** The processing tomato variety Jinfan 3166 was used to study the effects of synergistic regulation of brackish water with different salinity and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and yield of processing tomatoes under mulched drip irrigation to rationally develop and utilize brackish water resources in arid areas. Nine treatments of irrigation mineralization levels including 1.0 g/L (S1), 3.0 g/L (S2), 5.0 g/L (S3) and nitrogen application rates including 180 kg/hm<sup>2</sup> (N1), 240 kg/hm<sup>2</sup> (N2), and 300 kg/hm<sup>2</sup> (N3) were set up. The results showed that the SPAD value, transpiration rate ( $T_r$ ), net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and yield of leaves in processing tomato decreased gradually with the increase of irrigation salinity at the same nitrogen application level, and the leaf water use efficiency (LWUE) increased significantly at the stage of mature. The increase in nitrogen application (N3) significantly increased the SPAD value,  $T_r$ ,  $P_n$ , and  $G_s$  of leaf at the levels of S1 and S2. The N2 treatment at the S3 level had the best promotion effect, and the yield increased by 11.46%, 8.69%, and 5.17% compared to the N1 treatment, respectively. There was no significant difference in the yield of processing tomatoes under the N3 treatment at the levels of S1 and S2. It can be concluded that a salinity of 3.0 g/L irrigation and a nitrogen application rate of 300 kg/hm<sup>2</sup> can promote the photosynthesis of processing tomatoes and ensure the yield of processing tomatoes taking into account the photosynthetic characteristics and yield changes of processing tomatoes under mulched drip irrigation.

**Keywords** brackish water; nitrogen application rate; salinity; mulched drip irrigation; processing tomatoes; photosynthetic characteristics; yield

(责任编辑:张志钰)