





活性：采用氮蓝四唑（NBT）光还原法<sup>[15]</sup>测定；过氧化氢酶（CAT）：采用高锰酸钾滴定法<sup>[15]</sup>测定。

### 1.3.4 番茄产量

产量在设施番茄进入采摘期后，每 2~5 d 人工摘收 1 次。每次收获时，每个小区番茄按行摘收并称质量。

### 1.3.5 番茄品质

在开花结果盛期（6 月 29 日）进行第 1 次采摘，在各处理随机采 6 个鲜果样测定番茄果实的品质。可溶性固形物用手持折射仪（ATAGO—P<sub>32</sub>, Japan）测定；还原性糖用斐林试剂法测定<sup>[18]</sup>；硝酸盐用硫酸-水杨酸法测定<sup>[19]</sup>；Vc 用二氯酚靛酚滴定法测定<sup>[20]</sup>。

## 1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2018 对数据进行整理分析，使用 Origin 2018 进行绘图，应用 Spss 20.0-Duncan's 法检验处理间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤盐分分布

不同灌溉水矿化度下番茄开花结果期和结果末期土壤含盐量动态变化如图 3 所示，各处理随生育期的推进在垂直方向上变化规律基本一致，土壤含盐量随土层深度增加逐渐减小，盐分主要聚集在浅层土壤；生育中期水平方向 0~60 cm 范围内土壤含盐量呈先增大后减小趋势，20~40 cm 处土壤含盐量最大，土壤平均含盐量随灌溉水矿化度升高逐渐增大，其中

T1 处理和 T2 处理在浅层土壤 20~40 cm 处形成积盐区，T3、T4 处理在 0~40 cm 土层距离滴灌带 10~40 cm 处形成椭球状积盐区；随生育期推进，水平方向盐分逐渐被淋洗至远离滴灌带处，土壤含盐量随水平距离提高逐渐增大，其中 T1 处理和 T2 处理积盐区水平方向运移至 40~60 cm 处，T3 处理和 T4 处理土壤含盐量整体较高；表明随生育期推进咸水灌溉对滴灌带附近土壤具有一定淋洗作用，盐分淋洗至远离滴灌带位置，其中矿化度小于 4 g/L 时淋洗效果明显，滴灌带附近 0~30 cm 区域的土壤含盐量相对较低，形成低盐区，6~8 g/L 淋洗作用明显减弱。整体来看，生育期末盐分主要积聚在浅层土壤，形成积盐区，且随着灌溉水矿化度的提高积盐区逐渐扩大，其中高质量浓度咸水灌溉土壤含盐量整体较大。由表 1 各土层平均积盐率可以看出，开花结果期各处理 0~60 cm 土壤积盐率均随土层深度增加呈先增大后减小趋势，在 10~40 cm 土层最大；结果末期 T1 处理积盐率变化规律与开花结果期基本一致，T2—T4 处理积盐率随土层深度增加逐渐提高，CK 积盐率在 20~40 cm 最大，T1 处理积盐率在 10~20 cm 处最大；随生育期推进，CK 的 10~80 cm 土壤积盐率逐渐减少，至生育期末 0~10 cm 和 60~80 cm 土壤处于脱盐状态，T1 处理 10~60 cm 土壤积盐率逐增大，T2—T4 处理 0~80 cm 土壤积盐率逐渐增大，增加幅度随灌溉水矿化度的增大逐渐提高。

图 3 生育期内土壤含盐量

Fig.3 Soil salinity during growth period

表 1 不同处理下各土层平均积盐率

Table 1 Average salt accumulation rate of each soil layer under different treatments

土层深度/cm	土壤初始含盐量/(g kg <sup>-1</sup> )	开花结果期积盐率/%					结果末期积盐率/%				
		CK	T1 处理	T2 处理	T3 处理	T4 处理	CK	T1 处理	T2 处理	T3 处理	T4 处理
0~10	4.45	-32.43	-7.46	40.59	4.66	70.39	-10.77	68.41	107.03	174.15	204.64
10~20	1.31	15.12	56.41	129.58	224.26	345.56	36.20	174.46	219.07	388.61	607.88
20~40	0.64	74.71	117.98	195.11	279.28	321.14	69.11	120.14	242.38	594.11	651.64
40~60	0.50	38.41	66.96	42.13	128.17	76.59	1.74	60.37	245.46	564.21	814.22
60~80	0.32	141.41	100.49	84.34	86.17	6.13	-28.95	15.67	286.02	985.02	1005.28

综上可知，随着矿化度的增加，灌溉水对土壤淋洗效果逐渐减弱，土壤含盐量及积盐区范围明显增大。分析认为，咸水灌溉对滴灌带附近土壤盐分具有不同程度淋洗作用，部分盐分运移至深层和远离滴灌带处，滴灌带附近土壤在灌水洗盐和蒸发积盐作用下，土壤盐分处于动态平衡状态，但距离滴灌带较远位置土壤淋洗效果较弱，在淋洗排盐和蒸发积盐作用下形成明显的积盐区。

### 2.2 咸水灌溉对植株生长指标的影响

从图 4 各处理番茄生育期末植株茎叶干物质量、株高和茎粗可知，生育期末茎叶干物质量随灌溉水矿化度的提高逐渐降低，T4 处理最小达 30.49 g，较 CK 减少 75.08%；茎干物质量随灌溉水矿化度的提高呈先增加后减小的趋势，与 CK 相比，T1 处理提高 48.58%，T4 处理减少 47.28%；叶干物质量随灌溉水矿化度的提高呈逐渐减小的趋势；株高和茎粗随灌溉水矿化度提高呈先增加后减小趋势，在 T2 处理达到峰值，较 CK 分别增加了 7.08% 和 9.25%。

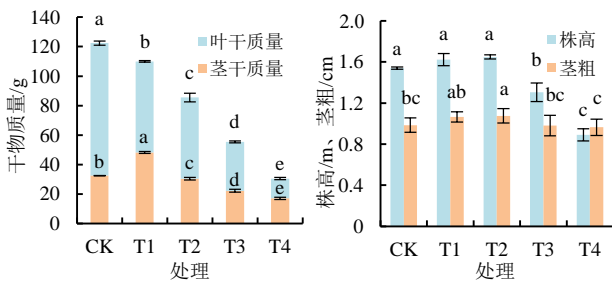


图 4 生育期末植株茎叶干物质量、株高和茎粗变化

Fig.4 Total dry matter mass, plant height and stem diameter at the end of growth period

综上可知，适宜矿化度范围内咸水 (2~4 g/L) 灌溉可以促进植株生长，但当灌溉水矿化度大于 4 g/L 时会显著抑制生长。

### 2.3 咸水灌溉对植株生理指标的影响

#### 2.3.1 番茄叶片叶绿素

表 2 为不同处理对番茄结果期叶片的叶绿素 a 量、叶绿素 b 量、叶绿素总量和类胡萝卜素的影响。由表

2 可知，与 CK 相比，T1 处理叶绿素 a 量显著增加，其他处理均差异不显著；T1 处理叶绿素 b 量及叶绿素总量差异不显著，其他处理均显著减少；T4 处理类胡萝卜素量差异不显著，其他处理均显著增加。且各处理叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量变化趋势一致，即随着灌溉水矿化度的增加均呈先增加后减小的规律。与 CK 相比，T1 处理叶绿素总量增加 12.93%，T2、T3、T4 处理分别降低 19.53%、24.10%、45.82%。可见，盐分胁迫会导致番茄叶片叶绿素的降解，且降解程度随着灌溉水矿化度的增加而增大。

表 2 番茄结果期不同处理番茄叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素

Table 2 Chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids in tomato leaves of different treatments at fruiting stage

处理	叶绿素 a/(mg g <sup>-1</sup> )	叶绿素 b/(mg g <sup>-1</sup> )	叶绿素总量/(mg g <sup>-1</sup> )	类胡萝卜素/(mg g <sup>-1</sup> )
CK	19.03±0.02b	10.57±0.78a	29.60±3.76ab	2.62±0.67b
T1	22.15±2.00a	11.85±1.20a	34.00±4.17a	3.96±0.33a
T2	18.45±1.23b	6.31±0.31b	24.77±2.49bc	4.05±0.59a
T3	17.73±1.36b	6.12±0.74b	23.85±4.95bc	3.91±0.21a
T4	16.65±0.83b	3.65±0.43c	20.30±1.50c	2.80±0.29b

#### 2.3.2 番茄叶片渗透调节物质

在盐胁迫条件下植株能够积累有机物或无机物以提高细胞液浓度，降低渗透势而表现出的调节作用称为渗透调节<sup>[14]</sup>，较高的土壤含盐量容易对植株造成渗透胁迫，从而引起渗透调节物质的积累。从图 5 不同灌溉水矿化度下番茄叶片中丙二醛量 (MDA)、脯氨酸量 (Pro)、可溶性糖量和蛋白量可以看出，咸水灌溉对番茄叶片中 MDA 没有显著影响；叶片中 Pro 量随灌溉水矿化度的增加逐渐增加，T1、T2、T3、T4 处理较 CK 分别增加 13.18%、23.14%、142.88% 和 171.73%；可溶性糖量变化规律与脯氨酸量一致，T1、T2、T3、T4 处理较 CK 分别增加 20.90%、37.02%、53.90% 和 74.81%；低质量浓度咸水灌溉对番茄叶片蛋白量无显著影响，当灌溉水矿化度大于 6 g/L 时蛋白量显著增加。

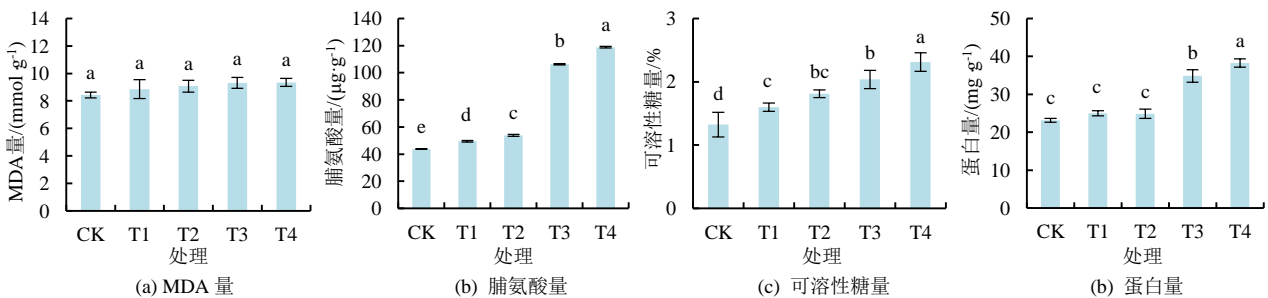


图 5 不同处理下渗透调节物质

Fig.5 Contents of osmotic adjustment substances under different treatments

#### 2.3.3 番茄叶片抗氧化酶系统

从图 6 不同灌溉水矿化度下番茄叶片抗氧化酶活性可以看出，咸水灌溉下番茄叶片 SOD 活性随

灌溉水矿化度的提高呈先增大后减小的趋势，T2 处理达到峰值，较 CK 增加 15.92%；POD 活性随灌溉水矿化度提高呈先减小后增大趋势，T1—T4 处理较 CK

分别减小了 17.73%、34.54%、32.87% 和 28.27%；CAT 增加 50.26%。活性随灌溉水矿化度的提高逐渐增大，T4 处理较 CK

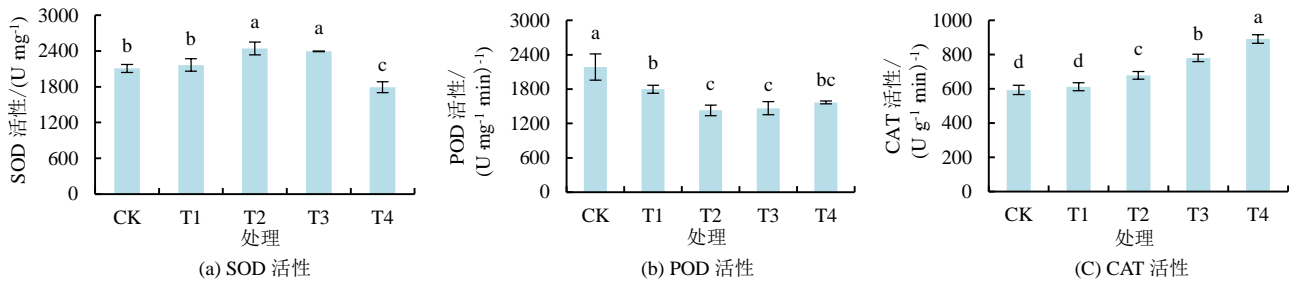


图 6 不同处理下叶片抗氧化酶量

Fig.6 Antioxidant enzyme content in leaves under different treatments

综合来看，抗氧化酶活性变化说明番茄叶片在遭受盐胁迫时内部在不停地进行自我调节来适应和缓解逆境带来的伤害，当灌溉水矿化度小于 4 g/L 时，植株在自我调节能力范围内，随着灌溉水矿化度的增加逐渐超出番茄的调节能力，使其受到较严重的伤害。

#### 2.4 咸水灌溉对番茄品质和产量的影响

从图 7 可知，咸水灌溉下设施番茄果实品质指标可知，设施番茄各项品质指标均随灌溉水矿化度的提高呈先增大后减小的趋势，与 CK 相比，咸水灌溉下可溶性固形物显著增加 ( $P<0.05$ )，T2 处理最大高了 14.50%；可溶性糖量在 T3 处理下最大，提高了 2.76%；硝酸盐量显著增加 ( $P<0.05$ )，T2 处理最大，提高了 119.45%；Vc 量显著增加 ( $P<0.05$ )，T2 处

理最大，提高了 107.41%。从表 3 不同灌溉水矿化度下番茄产量及品质等指标可以看出，果硬度在 0.55~0.69 N 之间，T1 处理最大，较 CK 提高了 11.29%；单株结果数及果硬度随灌溉水矿化度变化趋势均与产量一致，2~4 g/L 咸水灌溉可显著提高单株结果数，单果质量与灌溉水矿化度负相关(相关系数为 0.974 2)；产量随灌溉水矿化度的提高呈先增大后减小的趋势，T1 处理的产量最高，达到 36 046.90 kg/hm<sup>2</sup>，比 CK 显著增加 9.09%；与相比 CK，T2、T3、T4 处理则显著降低 ( $P<0.05$ )。综合考虑番茄的产量和品质等指标，2~4 g/L 矿化度的咸水灌溉，有利于番茄品质的提高及产量的形成。

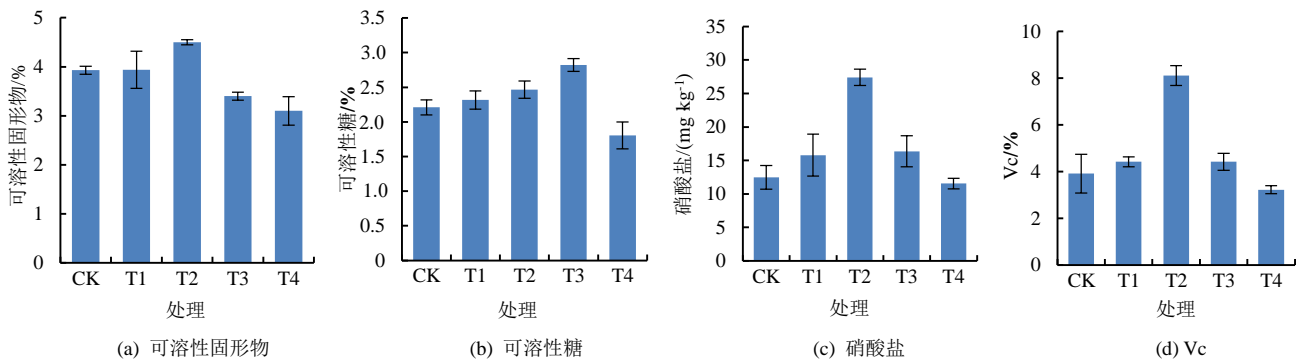


图 7 不同处理下番茄品质指标

Fig.7 Quality indexes of tomato under different treatments

表 3 不同处理下番茄的产量等指标

Table 3 Yield and other indicators of tomato under different treatments

处理	单株结果数/个	单果质量/g	产量/(t hm <sup>-2</sup> )	果硬度/N	排名
CK	6.6±0.40b	99.37±3.41a	32 772.02±37.11b	0.62±0.02b	2
T1	8.0±0.02a	90.43±3.63b	36 046.90±36.88a	0.69±0.004a	1
T2	7.9±0.11a	78.82±4.13c	31 093.40±39.45c	0.63±0.02b	3
T3	6.7±0.01c	73.18±1.85d	21 954.14±32.20d	0.60±0.04c	4
T4	5.2±0.26d	60.20±5.65e	15 855.83±41.83e	0.55±0.04d	5

### 3 讨论

本研究表明，土壤含盐量随土层深度增加逐渐减小，盐分主要聚集在浅层土壤，且随灌溉水矿化度的提高而增加，表明咸水灌溉会增加土壤含盐量，且土

壤蒸发使得盐分在土壤表层聚集<sup>[21]</sup>。生育中期随滴灌带距离增加呈先增大后减小的趋势，这是因为不断进入土体的水分对土壤中的盐分有一定淋洗作用，可将土体中过多的盐分带出根区<sup>[22]</sup>，在毛细管作用下盐分在 20~40 cm 处积聚形成积盐区，且随灌溉水矿化度

的提高积盐区范围不断向深层土壤扩散, 随生育期推进, 水平方向盐分逐渐被淋洗至远离滴灌带处, 生育期末盐分主要积聚在 0~20 cm 浅层土壤, 形成积盐区, 且随着灌溉水矿化度的提高逐渐增大, 其中高质量浓度咸水灌溉土壤含盐量整体较大。这与 Pasternak 等<sup>[23]</sup>经过连续 2 a 的咸水灌溉, 发现土壤盐分主要集中在 0~30 cm 土壤中, 作物根区土壤体积质量、盐分、pH 值和土壤含水率明显增加的结果基本一致, 众多学者在咸水灌溉研究中虽然设置的灌溉水矿化度梯度有所不同, 但总体得出咸水灌溉后土壤平均含盐量随灌溉水矿化度的提高逐渐增大的结果<sup>[4]</sup>。但与李丹等<sup>[9]</sup>的研究发现咸水灌溉并没有增加土体的盐分, 只是盐分在土体内进行了重新分布的结果不完全一致, 这是可能因为本试验在日光温室内进行, 未受到降水影响, 因此经过多次咸水灌溉后, 土壤含盐量显著增加。

土壤是作物赖以生存的物质基础, 土壤含盐量对作物生长及生态平衡产生了严重的影响。植株生长发育对盐分胁迫非常敏感, 可以通过生长指标来评价植株的耐盐能力和盐分胁迫程度<sup>[16]</sup>。本研究表明, 灌溉水矿化度对植株生长影响较大, 各处理间差异显著, 利用矿化度 2~4 g/L 的微咸水灌溉会促进番茄株高茎粗, 这与前人<sup>[24]</sup>研究结果适当盐分范围内的咸水灌溉可促进番茄生长的结论相一致; 孟庆英等<sup>[25]</sup>研究发现, 不同盐分浓度胁迫下番茄叶片叶绿素量先升高后降低然后趋于平稳, 这与本研究一致。而万晓等<sup>[26]</sup>研究认为, 随着盐分浓度提高, 植株叶绿素量及总生物量逐渐降低, 这与本研究发现随着灌溉水矿化度的提高总干物质质量逐渐降低的趋势一致, 但与本研究发现叶绿素和类胡萝卜素均随着灌溉水矿化度的增加均呈先增加后减小的规律不完全一致, 主要原因是其试验期仅进行 1 次咸水灌溉, 且仅对苗期番茄进行观测, 试验期较短植株受盐分影响不显著。

盐胁迫影响植株的生长通过渗透胁迫过程实现。植株体内的可溶性糖、脯氨酸 (Pro) 等可溶性物质能通过细胞内渗透调节等方式缓解渗透胁迫。姜淼等<sup>[27]</sup>认为 MDA 量可以作为植株耐盐性的鉴定, 且 MDA 量与植株耐盐性呈负相关关系。李丹等<sup>[9]</sup>研究发现, 咸水灌溉对番茄叶片 MDA 量无显著影响, 这与本研究结果一致。周广生等<sup>[28]</sup>认为, 脯氨酸的积累量与其耐盐性呈负相关关系, 脯氨酸积累可能是植物受到盐害的表现, 本研究也发现叶片 Pro 量随灌溉水矿化度的增加逐渐增加。可溶性糖是植株的主要渗透调节剂, 也是合成其他有机溶质的碳架和能量来源, 对细胞膜和原生质胶体起稳定作用<sup>[29]</sup>。有研究表明<sup>[30]</sup>在逆境胁迫下植株积累的可溶性糖越多, 本研究同样发现, 随灌溉水矿化度的增大可溶性糖量逐渐增加, 说明灌溉

水矿化度越高植株受到逆境伤害越大。可溶性蛋白为重要的渗透调节物质和营养物质, 其增加和积累能提高细胞的保水能力, 对细胞的生命物质及生物膜起到保护作用, 因此经常用作筛选抗性的指标之一。本研究发现, 蛋白量均随灌溉水矿化度的增加逐渐增加, 番茄植株可以通过渗透调节物质的增加来适应一定的盐胁迫环境。而周丹丹等<sup>[31]</sup>通过盐分胁迫香樟和朴树幼苗研究发现, 随着灌溉水矿化度的提高幼苗叶片的 Pro、可溶性糖和蛋白量均表现出先增加后减小的趋势, 可能是由于该试验灌溉水矿化度梯度与本试验设置不同, 且不同植物的渗透调节物质缓解渗透胁迫具有一定的差异性<sup>[32]</sup>所致。当植株生长在正常环境中时, 植株体内的活性氧 (ROS) 的产生与消除保持动态平衡状态, 而当植株在遭受盐胁迫时会打破植物体内原有 ROS 代谢的平衡<sup>[33]</sup>, 是植株遭受逆境损害的主要原因之一。只有提高或保持高水平逆境保护酶活性, 才能去除 ROS 将其保持在低水平, 防止 ROS 破坏生物膜的结构和功能<sup>[34]</sup>。随着灌溉水矿化度提高杜鹃叶片 SOD 活性先上升后下降, 且显著高于对照<sup>[35]</sup>, 这与本研究结果相似。本研究发现随灌溉水矿化度的提高果实中 POD 活性逐渐增大, 植株叶片 POD 活性呈先减少后增加的趋势, 当灌溉水矿化度达到 4 g/L 时最小。这与张海英<sup>[36]</sup>对辣椒芽苗的研究得出的在盐胁迫下, 随着盐浓度升高, 辣椒幼苗 POD 活性呈先下降后上升的趋势结果一致, 推测番茄叶片在咸水灌溉条件下, SOD、POD、CAT 之间存在协同作用, SOD 与 POD 形成互补。

一定的盐分胁迫有利于提高设施番茄产量和果实的品质, Campos 等<sup>[37]</sup>研究咸水灌溉对番茄产量品质的影响发现, 灌溉水矿化度的增加造成经济效益和总产量分别减少 11.9% 和 11.0%, 但可溶性固体和可滴定酸度分别增加 13.9% 和 9.4%。王相等<sup>[38]</sup>认为作物产量随灌溉水矿化度的增加而降低, 当灌溉水矿化度达 1.5 g/L 时可获得较高的产量。本研究表明, 番茄产量随灌溉水矿化度的提高呈先增大后减小趋势, 采用 2 g/L 的咸水灌溉时产量最佳, 采用 4 g/L 的咸水灌溉时番茄的可溶性固形物量、硝酸盐量及 Vc 量均达到最佳, 且与淡水灌溉相比, 产量仅减少 5.12% 未达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 然而杨文杰等<sup>[21]</sup>研究认为, 不同盐分对番茄的产量没有显著影响, 这与本研究发现, 用 2~4 g/L 的咸水灌溉可以保证番茄产量, 6~8 g/L 的咸水灌溉番茄产量显著降低的结果有所不同, 可能是由于其灌溉方式为膜下滴灌, 灌水后盐分淋洗至深层土壤和茎间, 而覆膜有效抑制了土壤蒸发, 降低了盐分在作物根区积聚现象, 弱化了灌溉水矿化度对作物的影响, 另外, 其灌水最大矿化度设置相对较低, 仅

为5 g/L,可能未找到灌溉水矿化度对作物产量的影响阈值,加上供试番茄品种不同,存在耐盐程度的差异,进而导致研究结果有所不同。综合以上分析表明,采用1~4 g/L的咸水灌溉对设施番茄的生长和产量是安全的。

#### 4 结论

1) 各处理生育期内垂直方向上土壤含盐量变化规律基本一致,即随土层深度增加逐渐减小;水平方向随生育期的推进,盐分逐渐向远离滴灌带处运移,生育期末盐分主要积聚在0~20 cm浅层土壤,形成积盐区,且随着灌溉水矿化度的提高逐渐扩大,高质量浓度咸水灌溉使土壤含盐量整体偏大。

2) 2~4 g/L的咸水灌溉,对番茄株高茎粗生长具有一定的促进作用,对干物质质量无显著影响,6~8 g/L咸水灌溉对番茄生长抑制作用明显;当灌溉水矿化度为2 g/L时叶绿素总量达到最大,4 g/L时类胡萝卜素量达到最大。

3) 当灌溉水矿化度大于4 g/L时,植物器官内大量积累的活性氧已经超出保护酶的清除能力;2~4 g/L咸水灌溉在保证番茄产量的同时,可显著提高果实的品质。综合考虑土壤盐分、植株生长生理及产量初步认为,在淡水资源紧缺,而地下咸水资源丰富的南疆地区,可以尝试采用2~4 g/L矿化度的咸水对设施番茄进行灌溉。

#### 参考文献:

[1] MAGÁN J J, GALLARDO M, THOMPSON R B, et al. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(9): 1 041-1 055.

[2] EGGLETON M, ZEGADA-LIZARAZU W, EPHRATH J, et al. The effect of brackish water irrigation on the above- and below-ground development of pollarded *Acacia saligna* shrubs in an arid environment[J]. *Plant and Soil*, 2007, 299(1/2): 141-152.

[3] SIKDER R K, WANG X R, ZHANG H H, et al. Influence of nitrogen on the growth and yield of cotton under salinity stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2022, 45(8): 1 181-1 197.

[4] FENG G X, ZHU C L, WU Q F, et al. Evaluating the impacts of saline water irrigation on soil water-salt and summer maize yield in subsurface drainage condition using coupled HYDRUS and EPIC model[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 258: 107-175.

[5] 周永学, 李美琪, 黄志杰, 等. 长期咸水滴灌对灰漠土理化性质及棉花生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(4): 12-20.

ZHOU Yongxue, LI Meiqi, HUANG Zhijie, et al. Effects of long-term saline water drip irrigation on physicochemical properties and cotton growth in grey desert soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4): 12-20.

[6] 王兴鹏, 严晓燕, 李宁, 等. 不同灌溉方式下枣树根区土壤洗盐效果试验[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 130-133.

WANG Xingpeng, YAN Xiaoyan, LI Ning, et al. Soil salt-washing effect of different irrigation modes in the oasis agriculture region of

desert with red jujube[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(1): 130-133.

[7] 尹志荣, 张永宏, 桂林国, 等. 微咸水滴灌对枸杞产量及土壤盐运动的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(7): 162-167.

YIN Zhirong, ZHANG Yonghong, GUI Linguo, et al. Characteristics of soil water and salt movement under drip irrigation with brackish water on Chinese wolfberry[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(7): 162-167.

[8] 姚玉涛, 张国新, 孙叶烁, 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 Yutao, ZHANG Guoxin, SUN Yeshuo, 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.

[9] 李丹, 万书勤, 康跃虎, 等. 滨海盐碱地微咸水滴灌盐调控对番茄生长及品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 39-50.

LI Dan, WAN Shuqin, KANG Yuehu, et al. Effects of water-salt regulation on tomato growth and quality under drip irrigation with brackish water in coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(7): 39-50.

[10] 宋阳, 崔晓晗, 张明, 等. 盐胁迫对番茄幼苗生理特性及离子分布的影响[J]. *北方农业学报*, 2019, 47(4): 115-121.

SONG Yang, CUI Xiaohan, ZHANG Ming, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics and ion distribution of tomato seedlings[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(4): 115-121.

[11] KHAN H A, SIDDIQUE K H M, COLMER T D. Vegetative and reproductive growth of salt-stressed chickpea are carbon-limited: Sucrose infusion at the reproductive stage improves salt tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(8): 2 001-2 011.

[12] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(3): 579-585.

CHEN Suying, ZHANG Xiyi, SHAO Liwei, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 579-585.

[13] 吴蕴玉, 金星, 徐元, 等. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉对番茄生长和产量品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2015(7): 21-24.

WU Yunyu, JIN Xing, XU Yuan, et al. Effects of saline water irrigation on tomato growth, quality and yield under straw mulching[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(7): 21-24.

[14] 黄丹, 王春霞, 何新林, 等. 微咸水膜下滴灌时序对土壤盐分及作物产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1): 7-11.

HUANG Dan, WANG Chunxia, HE Xinlin, et al. The impact of irrigation timing on soil salinity and crop yield under mulched drip irrigation with brackish water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(1): 7-11.

[15] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

LI Hesheng. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.

[16] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

ZHANG Zhiliang, QU Weijing, LI Xiaofang. *Experimental guidance in plant physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.

[17] 邹琦. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

ZOU Qi. *Plant physiology experiment guidance*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[18] 杨林娥, 彭晓光, 杨庆文, 等. 斐林试剂法测定还原糖方法的改进[J]. *中国酿造*, 2010, 29(5): 160-161.

YANG Line, PENG Xiaoguang, YANG Qingwen, et al. Improvement of the determination of reducing sugar with Fehling's reagent method[J]. *China Brewing*, 2010, 29(5): 160-161.

[19] 杨俊雪, 王冲, 石如岳, 等. 基质栽培对番茄产量和品质影响的

- Meta 分析[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(6): 47-53.  
YANG Junxue, WANG Chong, SHI Ruyue, et al. Effects of substrate culture on the yield and quality of tomato: A Meta-analysis[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(6): 47-53.
- [20] 宗学凤, 王三根. 植物生理研究技术[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2011.  
ZONG Xuefeng, WANG Sanguan. Research Technology of Plant Physiology[M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2011.
- [21] 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 Wenjie, WANG Zhenhua, REN Zuoli, 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.
- [22] 毛爽, 周万里, 杨帆, 等. 植物根系应答盐碱胁迫机理研究进展[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(10): 1 991-2 000.  
MAO Shuang, ZHOU Wanli, YANG Fan, et al. Research progress on mechanism of plant roots response to salt-alkali stress[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(10): 1 991-2 000.
- [23] PASTERNAK D, SAGIH M, DEMALACH Y, et al. Irrigation with brackish water under desert conditions XI. Salt tolerance in sweet-corn cultivars[J]. Agricultural Water Management, 1995, 28(4): 325-334.
- [24] 田萍, 李建设, 高艳明. 微咸水灌溉对日光温室番茄产量及果实各部位蔗糖代谢的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(6): 667-677.  
TIAN Ping, LI Jianshe, GAO Yanming. Effects of brackish water irrigation on tomato yield and fruit sucrose metabolism in sunlight greenhouse[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(6): 667-677.
- [25] 孟庆英, 张必弦, 张海玲, 等. NaCl 胁迫下番茄若干生理指标的变化[J]. 北方园艺, 2008(11): 30-33.  
MENG Qingying, ZHANG Bixian, ZHANG Hailing, et al. Changes of several physiological indicators in tomato under NaCl stress[J]. Northern Horticulture, 2008(11): 30-33.
- [26] 万晓, 刘秀梅, 王华田, 等. 高矿化度灌溉水磁化处理对绒毛白蜡生理特性及生长的影响[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 120-126.  
WAN Xiao, LIU Xiumei, WANG Huatian, et al. Effect of magnetic treatment of salty irrigation water on physiological and growth characteristics of potted fraxinus velutina seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 120-126.
- [27] 姜淼. 番茄盐胁迫下的生理生化特性及耐盐性 QTL 定位[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.  
JIANG Miao. Physiological and biochemical characteristics of tomato under salt stress and salt resistance QTL mapping[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [28] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1 378-1 382.  
ZHOU Guangsheng, MEI Fangzhu, ZHOU Zhuqing, et al. Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(11): 1 378-1 382.
- [29] 唐晓清, 刘渝, 杨睿, 等. 盐胁迫对苗期水飞蓟生理与活性成分的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 135-139.  
TANG Xiaoqing, LIU Yu, YANG Rui, et al. Effects of salt stress on physiology and active component of Silybum marianum at seedling stage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(21): 135-139.
- [30] 赵海洋, 许寅生, 王玉祥, 等. NaCl 胁迫对番茄幼苗生长的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(10): 148-149, 153.  
ZHAO Haiyang, XU Yinsheng, WANG Yuxiang, et al. Effects of NaCl stress on the growth of tomato seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017(10): 148-149, 153.
- [31] 周丹丹, 李存华, 杨庆山, 等. 盐胁迫对朴树叶片渗透调节物质及保护酶系统的影响[J]. 山东林业科技, 2016, 46(2): 1-5, 74.  
ZHOU Dandan, LI Cunhua, YANG Qingshan, et al. Effects of salt stress on osmotic regulatory substances and protective enzyme system in Celtis sinensis[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2016, 46(2): 1-5, 74.
- [32] 胡涛, 张鹤香, 郑福超, 等. 植物盐胁迫响应的研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(9): 3 006-3 015.  
HU Tao, ZHANG Gexiang, ZHENG Fuchao, et al. Research progress in plant salt stress response[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(9): 3 006-3 015.
- [33] 刘俊羽, 杨帆, 毛爽, 等. 植物脂质应答逆境胁迫生理功能的研究进展[J]. 生物工程学报, 2021, 37(8): 2 658-2 667.  
LIU Junyu, YANG Fan, MAO Shuang, et al. Advances in the physiological functions of plant lipids in response to stresses[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(8): 2 658-2 667.
- [34] 王娟, 李德全, 谷令坤. 不同抗旱性玉米幼苗根系抗氧化系统对水分胁迫的反应[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 77-82.  
WANG Juan, LI Dequan, GU Lingkun. The response to water stress of the antioxidant system in maize seedling roots with different drought resistance[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 77-82.
- [35] 吴月燕, 李波, 张燕忠, 等. 盐胁迫对杜鹃生理生化与叶绿体亚显微结构的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(6): 642-648.  
WU Yueyan, LI Bo, ZHANG Yanzhong, et al. Effects of salt stress on physiological-biochemical characteristics and chloroplast submicroscopic structure of Rhododendron indicum[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2011, 37(6): 642-648.
- [36] 张海英. 盐胁迫和碱胁迫对制干辣椒生长发育及果实品质的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.  
ZHANG Haiying. Effects of salt stress and alkali salt stress on the growth and fruit quality of the industry pepper[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.
- [37] CAMPOS C A B, FERNANDES P D, GHEYI H R, et al. Yield and fruit quality of industrial tomato under saline irrigation[J]. Scientia Agricola, 2006, 63(2): 146-152.
- [38] 王相平, 杨劲松, 姚荣江, 等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 54-63.  
WANG Xiangping, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Irrigation regime and salt dynamics for rice with brackish water irrigation in coastal region of North Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 54-63.