

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.042

土壤盐分垂向非均匀分布下的番茄盐分生产函数研究

陈盛¹ 黄达^{1,2} 王振昌¹ 郭相平¹ 张林瑄¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 利用番茄盆栽试验,在土表以下 17 cm 处布设秸秆隔层,有效隔断土壤毛管连续性,再结合灌溉水的淋洗作用,促使土壤盐分向下运移,盆栽土壤在垂直方向上趋于“上低下高”的非均匀分布状态,探究该盐分状态下番茄产量和作物不同生育阶段根系及盐分分布特征间的内在联系。结果表明,在土壤盐分垂向非均匀分布处理中,隔层以下土壤中过高的盐分含量抑制了番茄根系的生长与分布,而上层低盐区土壤中根系则呈现出补偿性生长。在盆栽土壤盐分含量一定时,盐分垂向非均匀分布处理的根系干物质量及果实产量均显著高于盐分均匀分布处理($P < 0.05$),盐分“上低下高”的差异性分布缓解了作物整体所受盐分胁迫。在参照传统水分生产函数 Stewart 模型和 Jensen 模型的基础上,分别利用表层盐分因子、平均盐分因子及根系加权平均盐分因子构建作物盐分生产函数,经函数精度评估后发现,利用根系加权平均盐分因子结合 Jensen 函数构建的作物分阶段生产函数对番茄产量的预测精度最高,而不同生育阶段中,番茄坐果期土壤含盐量及根系分布状况对最终产量的影响最大。

关键词: 番茄; 盐分胁迫; 非均匀分布; 盐分生产函数; 盐分因子; 产量

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)08-0388-09

OSID:



Salt Production Function in Tomato under Vertical Uneven Distribution of Soil Salt

CHEN Sheng¹ HUANG Da^{1,2} WANG Zhenchang¹ GUO Xiangping¹ ZHANG Shuxuan¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Tomato pot experiment was used to arrange straw capillary barrier at 17 cm below the soil surface, which effectively cut the continuity of soil capillary. Combined with the leaching effect of irrigation water, the soil salt moved downward, and the potted soil tended to be in a non-uniform distribution state in the vertical direction, which was lower in the upper layer and higher in the deep layer, and the internal relationship between tomato yield and root system and salt distribution characteristics at different growth stages was explored. The results showed that in the treatment of vertical non-uniform distribution of soil salt, the excessive salt content in the soil below the straw layer inhibited the growth and distribution of tomato roots, while the roots in the soil above straw layer with low salinity showed compensatory growth. When the salt content of potted soil was the same, the root dry matter mass and fruit yield of salt vertical non-uniform distribution treatment were significantly higher than those of salt uniform distribution treatment ($P < 0.05$). Differential distribution of salt content, which showed low salinity in the upper layer and higher in the deep layer, alleviated the salt stress of whole crops. Based on the traditional water production function, i. e., Stewart model and Jensen model, the crop salt production function was constructed by using surface salt factor, average salt factor and root weighted average salt factor respectively. After the function accuracy evaluation, it was found that the crop phased production function constructed by root weighted average salt factor combined with Jensen function had the highest prediction accuracy for tomato yield, while the soil salt content and root distribution in tomato fruit setting stage had the greatest impact on the final yield in different growth stages.

Key words: tomato; salt stress; uneven distribution; salt production function; salt factor; yield

收稿日期: 2021-11-28 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079041, 52109052)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(B210202118)、中国博士后科学基金项目(2021M690873)和广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金项目(桂科能 22-J-21-8)

作者简介: 陈盛(1989—),男,博士后,主要从事盐碱土改良和盐胁迫下植物响应研究,E-mail: chens@hhu.edu.cn

通信作者: 王振昌(1981—),男,副教授,博士生导师,主要从事盐碱地改良和节水灌溉研究,E-mail: wangzhenchang@hhu.edu.cn

0 引言

科学合理地开发改造滨海垦区低产农田对保障我国粮食生产安全、严守国家耕地红线具有重要意义。滨海垦区农田是在盐渍淤泥的基础上发育而成,围垦初期土体盐分含量高,过高的土壤盐分通过渗透胁迫和离子毒害影响作物生长^[1-2]。利用淡水淋洗,可在短期内迅速降低表层土壤盐分。然而,在灌溉间歇,可溶盐随着毛管水的上升向上移动,水分蒸发后,盐分重新积聚在土壤表面。因此,淡水淋洗带来的根区低盐环境只能短时间维持。为了提高淋溶效率和阻止盐分在表层土壤的重新积聚,已有的研究通过在土表以下埋设稻草、砾石或人工材料作为隔离层来打破毛管水的连续性^[3-4],其中秸秆被认为是廉价易得的隔层材料。研究表明,将秸秆埋设于土表以下20~40 cm深处形成隔离层,在土壤水分蒸发上升过程中,秸秆隔层能够打破土壤毛管连续性,防止深层土壤中可溶盐随毛管水上升并重新积聚于土表^[5]。此外,在灌溉淋洗阶段,秸秆隔层还被证明能够延缓土壤水分入渗速率,增加盐分溶解时间,从而提高淋洗脱盐效率^[6]。最终,在灌溉淋洗和秸秆隔离的双重作用下,作物根区易出现盐分的非均匀分布,表现为上层土壤盐分含量低、下层土壤盐分含量高的非均匀分布状态^[4]。

在秸秆隔层创造的垂向盐分非均匀分布条件下,上层主要根系分布层适宜的水盐环境对于缓解作物生长受到的盐分胁迫至关重要^[5]。此外,另有研究结果表明,与均匀低盐试验处理相比,在局部含盐量升高的盐分非均匀分布土壤环境中,高盐区植物根系生长受到的盐分胁迫对作物生长产生的影响不可忽视。BAZIHIZINA等^[7]对盐分非均匀分布条件下的作物生长研究表明,相较于单纯的低盐区域,作物生长及产量与根区的根系加权平均盐分数据关系密切。类似的,CHEN等^[8]在垂向盐分非均匀分布条件下关于番茄产量的研究也表明,作物整体所受的盐分胁迫程度与高、低盐分区域根系生物量及盐离子吸收量所构成的加权平均值呈现最为显著的相关关系。通过对以上现象进行机理分析,前人研究发现部分根系处于高盐环境有助于促进低盐区根系出现生长和吸水量的“补偿效应”^[9-11]。根系的“补偿效应”被认为是环境胁迫下作物生理响应的一种适应性策略:“逆境”(高盐)土壤区域中根系生长及功能受到限制时,将促使“顺境”(低盐)区域进行根系的增量生长,以平衡受阻部分的有限功能^[9]。进一步的,KONG等^[10]在盐分非均匀分布条

件下的研究表明,根区盐分差异增加了低盐侧根系中脱落酸(ABA)含量,认为激素水平的上升及其诱导的相关蛋白合成及基因表达是植物在低盐侧根系 Na^+ 离子外流和水分补偿性吸收的调控机制。在“补偿效应”的作用下,处于盐分非均匀分布条件下的植物整体根量及吸水量与均匀低盐试验处理间无显著差异^[5,11],且明显高于盐分总量相同的盐分均布土壤环境,最终表现为促进作物生长和产量累积^[12]。

作物生产函数被广泛应用于预测逆境条件下的作物产量^[13],其中分阶段生产函数是构建于假设作物各个生长阶段的逆境胁迫对作物产量的影响是独立的,再将各个生长阶段的影响进行加法或乘法计算后得到综合效应^[14]。前人在研究土壤水分与作物产量间相关关系时,传统的作物水分生产函数被大量使用,包括Blank模型、Stewart模型及Sudar模型等加法模型,以及Jensen模型、Minhas模型以及Hanks模型等乘法模型。而在近年的研究中,亦有研究者引入土壤盐分参数,参照传统的水分生产函数模型,构建了水盐生产函数或盐分生产函数。如HAGHVERDI等^[15]将作物生产函数作为粮食产量与水盐等因素间数学关系的经济分析工具,以Jensen等模型公式为基础,研究了作物不同生育阶段水盐因子影响最终产量的敏感程度。贺新^[16]在微咸水灌溉条件下以Jensen函数为基础,利用土壤盐分因子构建了产量预测函数。

然而,在已有的研究成果中,考虑了盐分非均匀分布土壤环境下的作物分阶段产量预测函数尚未见报道。本研究在盐分垂向非均匀分布条件下,以番茄不同生育阶段、不同土壤区域中根系分布与含盐率监测数据为基础,设置不同形式的盐分因子,构建生产函数,旨在进一步明确土壤盐分非均匀分布状态下番茄产量与作物不同生育阶段根系及盐分分布特征间的内在关联。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2016年4—7月在位于江苏省南京市的南方地区高效排灌农业水土环境重点实验室的试验大棚内开展,大棚采用无滴膜覆盖,四周通风,无额外温度或光照补偿设施。试验盆体积为20.0 L(上下直径分别为30 cm和25 cm,深42 cm),底部设有直径0.5 cm的排水孔。试验用土取自江苏东台沿海地区,属粉砂,初始容重及含盐量分别为 1.50 g/cm^3 和 9.1 g/kg ,土壤中主要离子含量(质量比)见表1。

表1 土壤主要离子含量

Tab.1 Content of main ions in soil g/kg

参数	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
数值	2.530	0.009	0.164	0.027	4.705	0.218	0.883	0.537

将部分土壤淋洗脱盐后风干,脱盐后土壤含盐量为0.1 g/kg,将脱盐土(含盐量0.1 g/kg)和原始土(含盐量9.1 g/kg)按不同比例混合后得到含盐量分别为0.3、0.7、1.0、1.3、1.7、2.0、3.0、3.3、4.0、5.0、6.7、8.3 g/kg的供试土。基于前期研究中观察到番茄生长过程中所能耐受的盐分上限,考虑生产实际中滨海盐土作物种植所受盐分胁迫存在的高、中、低差异,供试土壤含盐量均值分别定为1、3、5 g/kg。

为模拟盐土农田作物种植前利用淡水充分淋洗、未充分淋洗及未淋洗3种状态,分别选用上下层土壤盐分比例为1:5、2:4和3:3开展研究。综上,试验共设置9个处理(表2),每个处理14个重复。

表2 番茄盆栽试验处理

Tab.2 Treatment of tomato pot experiment

含盐量均值/ (g·kg ⁻¹)	上下层盐分比例		
	1:5	2:4	3:3
1	T _{0.3:1.7}	T _{0.7:1.3}	T _{1:1}
3	T _{1:5}	T _{2:4}	T _{3:3}
5	T _{1.7:8.3}	T _{3.3:6.7}	T _{5:5}

注:各处理编号下标为上下层土壤含盐量,如T_{0.3:1.7}表示上层含盐量为0.3 g/kg,下层含盐量为1.7 g/kg的试验处理。

在不同含盐量的试验用土中添加1.5 g/kg基质(GB-pindstrup substrate No.1, pH值6.0)、0.015 g/kg尿素(CO(NH₂)₂)、0.116 g/kg有机肥(4%N、4%P和4%K)、0.006 g/kg硫酸钾(K₂SO₄)和0.018 g/kg磷酸二氢钾(KH₂PO₄),混合完成后的土壤干容重降低至0.94 g/cm³,田间持水率为37%。以风干后质量为50 g、厚度为3 cm的水稻秸秆为隔离层,隔离层设置在土表以下17 cm处。秸秆隔层上下回填不同含盐量(表2)的试验土壤。

番茄(*Solanum lycopersicon* L. var. Yazhoufenwang)于2016年3月15日播种于高10 cm、直径5 cm的培养皿中。当番茄苗出现第3片真叶时(4月30日),选择相同株高(15 cm)的幼苗连同培养皿土壤一同移栽到试验盆中,移栽时番茄根系均处于秸秆隔层上方。整个生长季分为4个阶段:苗期、花期、坐果期和收获期。当第3个花序出现后,对番茄植株进行摘心,摘除其主茎上的顶芽。害虫和杂草控制遵循当地种植惯例。

采用称量法对盆栽土壤水分含量进行监测,并计算得到土壤含水率(θ_v),用于控制灌溉。试验土壤在苗期保持约50%的田间持水率(θ_f),此后,灌溉下限设定为50% θ_f (花期和坐果期)和60% θ_f (收获期),而灌溉上限在整个生育期均维持在80% θ_f 。

1.2 指标测定

将5TE探头(Decagon Devices INC., Pullman, WA, 美国)分别埋入上层(土表以下9 cm处)和下层(秸秆隔层以下9 cm处)土壤的中心位置,用于连续监测番茄盆栽上下层土壤电导率(EC_{1:5},图1)及无作物土柱的上下层土壤电导率,每10 min测定一次,测试数据传输至EM50数据采集器(Decagon Devices INC., Pullman, WA, 美国)。土壤含盐量计算公式为

$$S = 2.63EC_{1:5} \quad (1)$$

式中 S——土壤含盐量, g/kg

EC_{1:5}——土壤电导率, mS/cm



图1 番茄盆栽示意图

Fig.1 Tomato pot diagram

分别在番茄生长苗期、花期、坐果期及收获期末对每个试验处理随机选取3个重复进行破坏试验,以秸秆隔层为界,分别收集各盆栽上下层土壤中的番茄根系,经干燥后测定根系干物质质量(g/株)。

在果实成熟期,每7 d对成熟果实进行采摘测产。

1.3 函数构建

针对以隔离层为界的上下层土壤盐分分布特征,分别构建了表层盐分因子 R_{sur} 、平均盐分因子 R_{ave} 、根系加权平均盐分因子 R_{root} ,计算式为

$$R_{sur} = \frac{S_{a-upp}}{S_{m-upp}} \quad (2)$$

$$R_{ave} = \frac{\frac{S_{a-upp} + S_{a-low}}{2}}{\frac{S_{m-upp} + S_{m-low}}{2}} \quad (3)$$

$$R_{root} = \frac{\frac{S_{a-upp}r_{a-upp} + S_{a-low}r_{a-low}}{r_{a-upp} + r_{a-low}}}{\frac{S_{m-upp}r_{m-upp} + S_{m-low}r_{m-low}}{r_{m-upp} + r_{m-low}}} \quad (4)$$

式中 S_{a-upp} 、 S_{a-low} ——上、下层土壤的实测含盐量, g/kg

r_{a-upp} 、 r_{a-low} ——上、下层土壤中的根系干物质量, g/株

S_{m-upp} 、 S_{m-low} ——最高产量处理对应的上、下层土壤含盐量, g/kg

r_{m-upp} 、 r_{m-low} ——最高产量处理对应的上、下层根系干物质量, g/株

本研究在设置盐分因子的基础上, 分别以 STEWART 等^[17]和 JENSEN^[18]提出的作物生产函数为基础, 引入表层、平均以及根系加权平均盐分因子, 构建不同生育期番茄产量与土壤含盐率的关系。

Stewart 盐分生产函数为

$$S(R_{sur}) = \frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (-\beta_{i-sur}) \left(1 - \frac{S_{ai-upp}}{S_{mi-upp}} \right) \quad (5)$$

$$S(R_{ave}) = \frac{Y_a}{Y_m} =$$

$$1 - \sum_{i=1}^n (-\beta_{i-ave}) \left(1 - \frac{S_{ai-upp} + S_{ai-low}}{S_{mi-upp} + S_{mi-low}} \right) \quad (6)$$

$$S(R_{root}) = \frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n (-\beta_{i-root}) \cdot$$

$$\left(1 - \frac{\frac{S_{ai-upp}r_{ai-upp} + S_{ai-low}r_{ai-low}}{r_{ai-upp} + r_{ai-low}}}{\frac{S_{mi-upp}r_{mi-upp} + S_{mi-low}r_{mi-low}}{r_{mi-upp} + r_{mi-low}}} \right) \quad (7)$$

Jensen 盐分生产函数为

$$J(R_{sur}) = \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{S_{ai-upp}}{S_{mi-upp}} \right)^{-\lambda_{i-sur}} \quad (8)$$

$$J(R_{ave}) = \frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{S_{ai-upp} + S_{ai-low}}{S_{mi-upp} + S_{mi-low}} \right)^{-\lambda_{i-ave}} \quad (9)$$

$$J(R_{root}) = \frac{Y_a}{Y_m} =$$

$$\prod_{i=1}^n \left(\frac{\frac{S_{ai-upp}r_{ai-upp} + S_{ai-low}r_{ai-low}}{r_{ai-upp} + r_{ai-low}}}{\frac{S_{mi-upp}r_{mi-upp} + S_{mi-low}r_{mi-low}}{r_{mi-upp} + r_{mi-low}}} \right)^{-\lambda_{i-root}} \quad (10)$$

式中 Y_a ——不同土壤盐分处理下作物产量, g/株

Y_m ——无盐胁迫处理下作物产量最大值, g/株

S_{ai-upp} 、 S_{ai-low} ——各试验处理在生育期 i 期间对应的上、下层土壤含盐量, g/kg

S_{mi-upp} 、 S_{mi-low} ——无盐胁迫处理在生育期 i 期间对应的上、下层土壤含盐量, g/kg

r_{ai-upp} 、 r_{ai-low} ——各试验处理在生育期 i 期间对应的上、下层土壤中的根系干物质量, g/株

r_{mi-upp} 、 r_{mi-low} ——无盐胁迫处理在生育期 i 期间对应的上、下层土壤中的根系干物质量, g/株

β_i ——Stewart 盐分生产函数中作物产量的盐分胁迫敏感系数

λ_i ——Jensen 盐分生产函数中作物产量的盐分胁迫敏感指数

i ——生育期 n ——生育期数量

1.4 函数精度评估

为评价函数对产量预测的准确程度, 对预测产量与实测产量做线性回归, 分析决定系数 R^2 , 此外, 还计算了估计误差和函数精度的指标, 包括: 均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (AE)、建模效率 (EF) 和一致性指数 (d_{IA})。RMSE 和 AE 越小, EF 越大, d_{IA} 越接近 1, 表明建模精度越高。

1.5 数据分析

采用 SPSS 13.0 软件 (SPSS, Chicago, IL, 美国) 进行差异分析以及敏感指数与敏感系数的计算。

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量

番茄盆栽试验各处理作物生育期内上下层土壤含盐量见图 2, 在灌溉淋洗及秸秆隔层隔断毛管水的双重作用下, 各处理上层土壤含盐量总体呈下降趋势。而下层土壤含盐量呈先上升后下降的趋势, 其因为在番茄生育前期, 随着上部土壤中盐分的淋洗, 下部土壤盐分上升, 随着淋洗, 盐分向更深处土壤运移, 因此, 在番茄生育后期, 下层土壤含盐量又呈下降趋势。

在对各生育阶段上下层土壤含盐量数据分析后发现, 各处理间盐分分布差异程度仍与盐分初始设置维持一致, 即初始条件下, 上下层土壤盐分差异相对较大的试验处理, 番茄生育期内仍维持较大的差异性。经计算, 在番茄生长各生育期, 处理间上下层土壤含盐量比值如表 3 所示。

分析可知, 相同盐分均值的 3 个处理组内盐分差异程度由小到大依次均为 $T_{0.3:1.7}$ 、 $T_{0.7:1.3}$ 、 $T_{1:1}$, $T_{1:5}$ 、 $T_{2:4}$ 、 $T_{3:3}$, $T_{1.7:8.3}$ 、 $T_{3.3:6.7}$ 、 $T_{5:5}$, 即在含盐量均值相同的试验组中, 隔离层上下土壤含盐量差异次序于番茄全生育期内未发生改变。

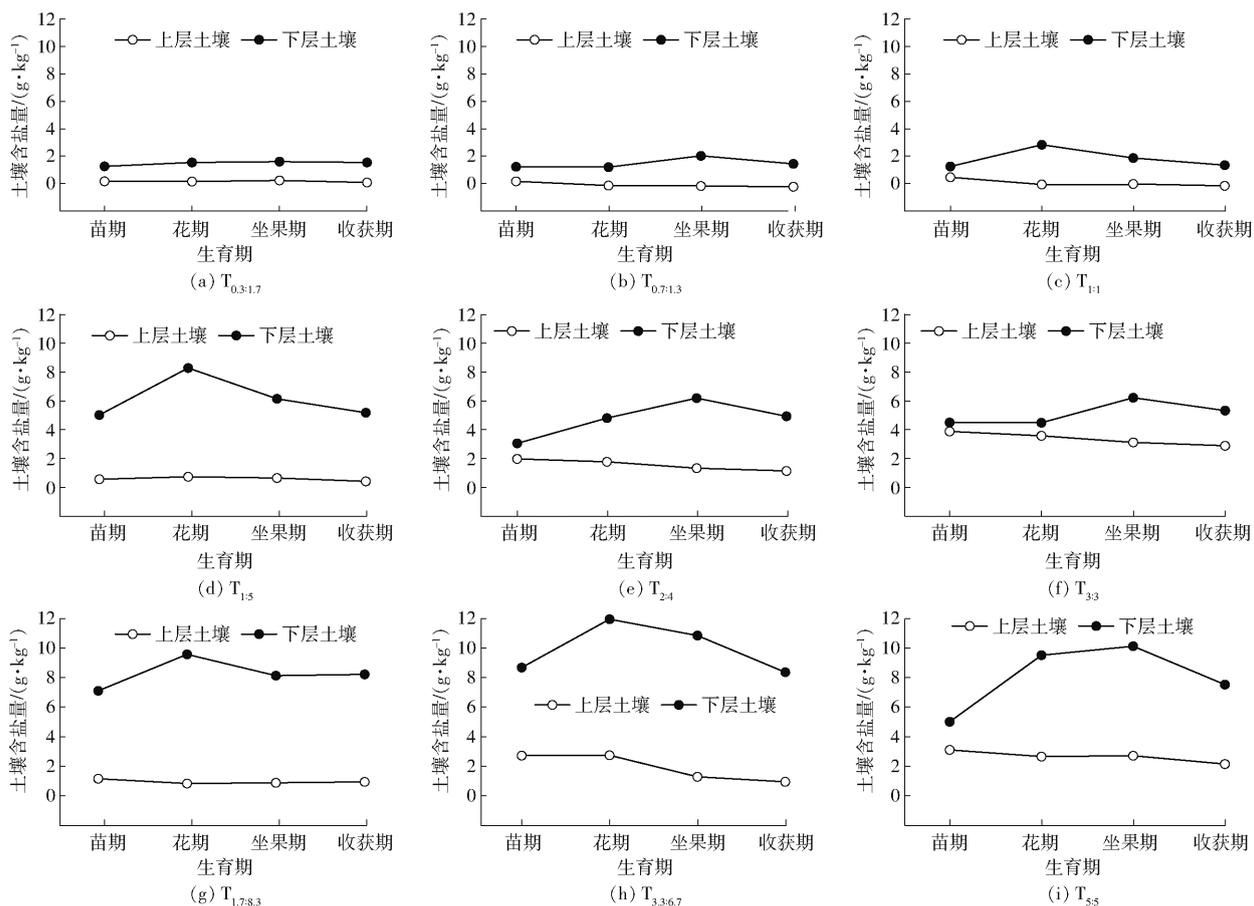


图2 上下层土壤含盐量

Fig.2 Salt content of upper and lower soil

表3 不同生育期上下层土壤含盐量比值

Tab.3 Ratio of salt content in upper and lower soil at different growth stages

生育期	T _{0.3:1.7}	T _{0.7:1.3}	T _{1:1}	T _{1:5}	T _{2:4}	T _{3:3}	T _{1.7:8.3}	T _{3.3:6.7}	T _{5:5}
苗期	0.150	0.334	0.513	0.133	0.654	0.784	0.205	0.346	0.640
花期	0.112	0.144	0.195	0.102	0.378	0.681	0.122	0.256	0.300
坐果期	0.057	0.080	0.152	0.123	0.223	0.324	0.148	0.152	0.288
收获期	0.068	0.078	0.122	0.101	0.241	0.339	0.154	0.156	0.311

2.2 根系干物质量

盆栽番茄不同生育阶段根系数据显示,在苗期,各处理根系均处于隔离层上方土壤,且处理间无显著差异。自花期开始,各处理根系开始穿透秸秆隔层出现在下层土壤。

由番茄盆栽根系总干物质量(上层与下层之和,见图3,图中小写字母表示各处理上层或下层土壤中根系干物质量(g/株)的差异性;大写字母表示各处理根系干物质总量(g/株,上下层之和)的差异性,不同字母间存在差异表示不同处理间差异显著($P < 0.05$))可知,根系总干物质量随土壤含盐量升高而降低,在收获期,处理 T_{5:5} 根系干物质量为 T_{3:3} 处理的 63.5%,为 T_{1:1} 处理的 40.1%。此外,土壤盐分分布状况也会影响根系总干物质量,如在土壤含盐量均值为 3 g/kg 和 5 g/kg 的处理中,盐分垂向

非均匀分布处理 T_{1:5} 与 T_{1.7:8.3} 根系干物质量分别为盐分均匀分布处理 T_{3:3} 和 T_{5:5} 的 1.75 倍和 1.67 倍,差异显著($P < 0.05$)。分析盆栽上下层土壤中根系干物质量数据发现,在土壤含盐量均值一致的处理中,以收获期为例,T_{1:5} 处理上层土壤中根系干物质量显著高于处理 T_{3:3} (2.47 倍),而下层根系干物质量则低于后者,为 T_{3:3} 处理的 65.9% ($P < 0.05$)。同样的,在处理 T_{1.7:8.3} 与 T_{5:5} 间,前者上层根系为后者的 2.47 倍,而下层仅为后者的 35.4%,差异显著($P < 0.05$)。表明相较于盐分均匀分布处理,在盐分垂向非均匀分布处理中,高盐区作物根系质量下降,而低盐区根系则出现补偿性上升,最终,使得根系总干物质量有所上升。

根系的补偿性生长更为显著地表现在处理 T_{1:5} 与处理 T_{1:1} 的比较中,前者盐分总量约为后者 3 倍,

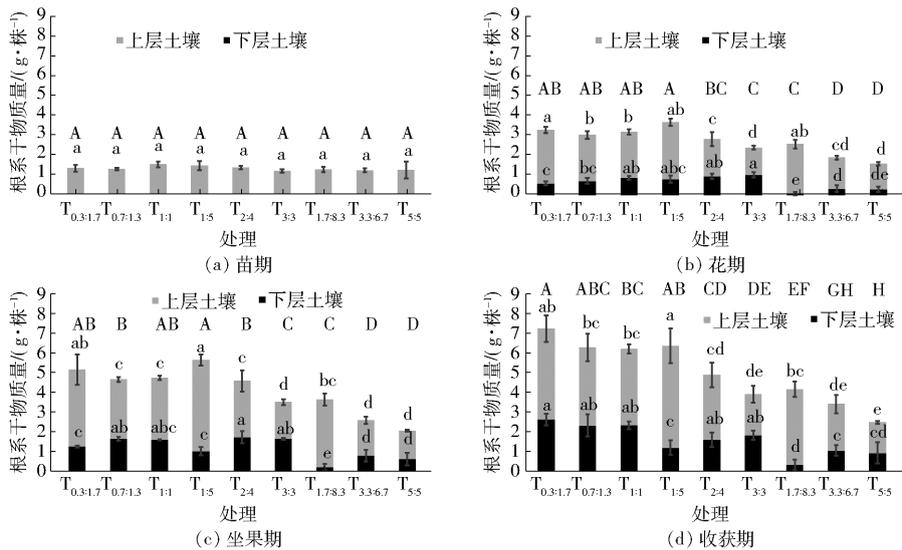


图 3 番茄根系干物质质量

Fig. 3 Dry matter mass of tomato roots

但上层土壤含盐量基本一致,作物根系数据显示,在下层土壤根系干物质质量显著降低的情况下(51.6%),处理 $T_{1:5}$ 上层根系干物质质量升高至处理 $T_{1:1}$ 的 1.33 倍,差异显著($P < 0.05$),表明在部分根系受到高盐胁迫而生长受阻的情况下,低盐区根系将出现显著的补偿性生长,最终,处理 $T_{1:5}$ 作物根系质量不低于均匀低盐处理 $T_{1:1}$ (提升 0.25%,无显著差异($P > 0.05$))。

2.3 番茄产量

各处理的番茄产量见图 4(图中不同小写字母表示不同处理差异显著($P < 0.05$))。土壤盐分总量升高显著抑制了番茄产量,如处理 $T_{3:3}$ 番茄产量为处理 $T_{1:1}$ 的 39.0%,而 $T_{5:5}$ 处理产量更是显著降低至处理 $T_{1:1}$ 的 14.3% ($P < 0.05$)。而土壤盐分垂向分布状况也会影响番茄产量,当土壤含盐量均值一致时,上下层土壤含盐量差异越大,番茄产量越高,在土壤含盐量均值分别为 1、3、5 g/kg 的处理组内比较中,盐分垂向非均匀分布处理 $T_{0.3:1.7}$ 、 $T_{1:5}$ 和 $T_{1.7:8.3}$ 番茄产量依次为盐分均匀分布处理 $T_{1:1}$ 、 $T_{3:3}$ 和 $T_{5:5}$ 的 1.18、2.27、3.76 倍,差异显著($P < 0.05$)。

含盐量均为 3 g/kg 的处理组中,处理 $T_{2:4}$ 番茄产量为处理 $T_{1:5}$ 的 55.00%,处理 $T_{3:3}$ 产量更是降低至处理 $T_{1:5}$ 的 38.12%,差异显著($P < 0.05$)。

2.4 盐分生产函数

以盆栽试验数据为基础,研究番茄相对产量(Y_a/Y_m)与不同生育阶段上下层土壤盐分间的关系。选择 Steward 模型基础公式及 Jensen 模型基础公式,分别利用盆栽番茄苗期、花期、坐果期及收获期上下层土壤含盐量(g/kg)及根系干物质质量

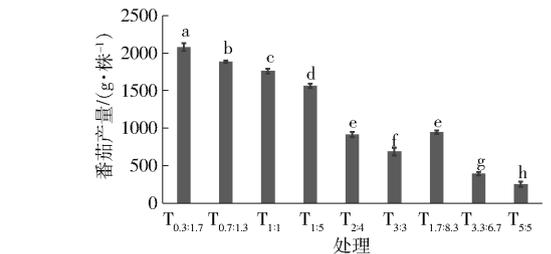


图 4 盆栽番茄产量

Fig. 4 Potted tomato yield

(g/株)构建表层盐分因子(R_{sur})、平均盐分因子(R_{ave})及根系加权平均盐分因子(R_{root}),对番茄产量进行预测,并分析番茄产量对不同生育期作物生长所受盐分胁迫的敏感程度。

函数预测产量与实际产量间 R^2 如表 4 所示,根系加权平均盐分因子预测产量与实际产量间相关度

表 4 函数精度评价结果

Tab. 4 Function accuracy evaluation results

盐分因子	评估参数	Steward 模型	Jensen 模型
表层盐分因子	R^2	0.610 4	0.642 4
	RMSE/(g·株 ⁻¹)	328.16	294.06
	AE/(g·株 ⁻¹)	259.77	264.41
	EF	0.733 6	0.786 1
	d_{IA}	0.896 2	0.919 9
平均盐分因子	R^2	0.759 0	0.618 1
	RMSE/(g·株 ⁻¹)	287.83	313.62
	AE/(g·株 ⁻¹)	250.55	253.30
	EF	0.795 1	0.756 7
	d_{IA}	0.930 5	0.923 9
根系加权平均盐分因子	R^2	0.867 2	0.910 8
	RMSE/(g·株 ⁻¹)	235.17	163.57
	AE/(g·株 ⁻¹)	194.63	128.49
	EF	0.850 2	0.931 4
	d_{IA}	0.958 7	0.974 8

高于表层盐分因子与平均盐分因子,利用根系加权平均盐分因子构建的 Steward 生产函数预测产量与实际产量间进行相关性分析, R^2 为 0.867 2 ($P < 0.05$), 而 Jensen 生产函数下利用根系加权平均盐分因子预测的产量与实际产量间相关关系则达到极显著水平 (R^2 为 0.910 8, $P < 0.01$)。

结合 RMSE、AE、EF 及 d_{IA} 评价结果表明(表 4), Jensen 生产函数预测精度优于 Steward 生产函数, 其中又以根系加权平均盐分因子为基础构建的 Jensen 盐分生产函数(Jensen SPF)对实际产量的预测精度最高, RMSE 为 163.57 g/株, AE 为 128.49 g/株, EF 为 0.931 4, $d_{IA} = 0.974 8$ 。

各生育期敏感系数 β 或敏感指数 λ 越大, 该阶段番茄生长受到盐分胁迫对最终产量的影响越大。如表 5 所示, 不同生育阶段盐分影响因子结果显示, 番茄生长苗期及收获期土壤盐分含量及其分布对最终产量影响相对较低, 敏感系数 β 或敏感指数 λ 均不大于 0.324 8。其中利用表层盐分因子与根系加权平均盐分因子构建的 Steward 模型中, 苗期敏感系数为负值, 但趋近于 0。分析认为导致该结果的原因为番茄幼苗移栽后, 缓苗期各处理番茄植株对水分的消耗较小且差异不大, 此期间盆栽水分消耗主要来源于棵间蒸发, 因此, 敏感系数出现趋于 0 的负值应为数据模拟过程中产生的数据误差。花期和坐果期盐分因子对产量产生显著影响, 利用根系加权平均盐分因子构建的 Steward 作物盐分生产函数中, 坐果期敏感系数 β 为 0.456 8, 而利用根系加权平均盐分因子构建的 Jensen 作物盐分生产函数中, 坐果期敏感指数 λ 更是达到 0.784 9, 影响程度大于其他生育阶段。

表 5 番茄不同生育阶段盐分敏感系数或敏感指数

Tab. 5 Salt sensitivity coefficient on sensitivity index of tomato at different growth stages

模型	敏感系数 β 或敏感指数 λ			
	苗期	花期	坐果期	收获期
Steward - R_{upp}	-0.017 3	0.297 3	0.278 4	0.239 2
Steward - R_{ave}	0.263 7	0.153 6	0.338 5	0.092 2
Steward - R_{root}	-0.025 9	0.198 7	0.456 8	0.235 8
Jensen - R_{upp}	0.056 4	0.273 2	0.482 5	0.321 2
Jensen - R_{ave}	0.027 6	0.674 2	0.572 8	0.246 2
Jensen - R_{root}	0.028 4	0.587 9	0.784 9	0.324 8

经模型精度评估和敏感因子合理性分析, 利用根系加权平均盐分因子构建的 Jensen 作物盐分生产函数对产量的预测效果最优。将不同生育阶段敏感因子代入 Jensen 函数公式(式(10))后得到适用于本试验盆栽番茄的产量预测公式为

$$J(R_{com}) = \frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{S_{a1-upp}r_{a1-upp} + S_{a1-low}r_{a1-low}}{r_{a1-upp} + r_{a1-low}} \right)^{-0.0284} \cdot \left(\frac{S_{m1-upp}r_{m1-upp} + S_{m1-low}r_{m1-low}}{r_{m1-upp} + r_{m1-low}} \right)^{-0.5879} \cdot \left(\frac{S_{a2-upp}r_{a2-upp} + S_{a2-low}r_{a2-low}}{r_{a2-upp} + r_{a2-low}} \right)^{-0.5879} \cdot \left(\frac{S_{m2-upp}r_{m2-upp} + S_{m2-low}r_{m2-low}}{r_{m2-upp} + r_{m2-low}} \right)^{-0.7849} \cdot \left(\frac{S_{a3-upp}r_{a3-upp} + S_{a3-low}r_{a3-low}}{r_{a3-upp} + r_{a3-low}} \right)^{-0.7849} \cdot \left(\frac{S_{m3-upp}r_{m3-upp} + S_{m3-low}r_{m3-low}}{r_{m3-upp} + r_{m3-low}} \right)^{-0.3248} \cdot \left(\frac{S_{a4-upp}r_{a4-upp} + S_{a4-low}r_{a4-low}}{r_{a4-upp} + r_{a4-low}} \right)^{-0.3248} \cdot \left(\frac{S_{m4-upp}r_{m4-upp} + S_{m4-low}r_{m4-low}}{r_{m4-upp} + r_{m4-low}} \right)^{-0.3248} \quad (11)$$

3 讨论

盐分对作物生长造成的影响主要包括渗透胁迫和离子毒害, 导致作物生长受到限制并最终影响作物产量。世界上约有 1/3 的土壤盐分含量过高, 严重影响着农业可持续发展^[19], BAZIHIZINA 等^[20]的研究表明, 当土壤电导率高于 2.5 dS/m 后, 电导率每升高 1 dS/m, 产量下降 10%。本研究结果也表明, 当土壤含盐量由 1 g/kg 升高至 3 g/kg 时, 处理 $T_{3;3}$ 番茄产量较处理 $T_{1;1}$ 降低 61.0%, 而当土壤含盐量进一步升高至 5 g/kg 时, 处理 $T_{5;5}$ 番茄产量更是降低至处理 $T_{1;1}$ 的 14.3%。盐分总量仅是影响作物产量的因素之一, 前人在对番茄、苜蓿和高粱等的研究中发现, 土壤盐分非均匀分布能够有效缓解作物受到的盐分胁迫, 进而达到保证作物生长, 提升作物产量的目的^[21-23], 因此盐分分布特征也是影响作物产量的另一关键因素。本研究开展的番茄盆栽试验结果表明, 盐分非均匀分布处理番茄产量较盐分均匀分布处理显著上升, 当土壤含盐量均值相同时, 处理 $T_{0.3;1.7}$ 番茄产量较处理 $T_{1;1}$ 升高 18.1%, 处理 $T_{1;5}$ 番茄产量较处理 $T_{3;3}$ 升高 127.5%, 处理 $T_{1.7;8.3}$ 番茄经济产量更是升高到处理 $T_{5;5}$ 的 3.76 倍。上述结果表明当土壤总体盐分含量一致时, 土壤盐分“上低下高”的垂向非均匀分布状态能够有效缓解作物所受盐分胁迫, 这与前人已有的研究结果相同^[22]。同时, 植株受到盐分胁迫程度越大, 即上下层土壤盐分比例相同时(本研究中均为 1:5), 土壤总含盐量越高, 土壤盐分非均匀分布处理对番茄产量的提升效果越明显。

盐分环境下番茄果实产量与作物根系生长及分布特征密切相关。研究发现,当土壤盐分均匀分布时,随着土壤含盐量的升高,根系干物质总量呈下降趋势,如本研究中处理 $T_{3:3}$ 和处理 $T_{5:5}$ 根系总干物质质量分别降低至处理 $T_{1:1}$ 的 77.2% 和 40.1%, 与前人已有的相关研究结果趋势相同^[19-20]。而当作物根系分布于盐分异质的土壤环境中时,部分根系受到的高盐胁迫将会诱导另一部分处于低盐环境中的作物根系产生补偿性生长。如在处理 $T_{1:5}$ 中,与盐分均匀分布的处理 $T_{3:3}$ 相比,处于土壤初始含盐量为 5 g/kg 的隔离层以下土壤中的根系干物质量下降约 34.1%,而上层低盐区根系则为处理 $T_{3:3}$ 同区域土壤中的 2.49 倍。进一步地,与均匀低盐处理 $T_{1:1}$ 比较, $T_{1:5}$ 处理上层土壤中根系质量同样较 $T_{1:1}$ 处理升高了 47%,两个处理上下层土壤中根系总干物质量间无显著差异($P > 0.05$)。PEREZ-PEREZ 等^[24] 得到了类似的研究结果,认为盐分非均匀分布土壤环境中低盐区根系生长产生的补偿效应是均匀低盐或高盐土壤环境中不具备的,生长于盐分非均匀分布土壤环境的作物在局部的高盐根系环境的刺激下产生相应的生理应激反应,如产生脱落酸(ABA)等物质,促进作物根系在低盐区域增加根系分布并提升根系吸水能力。局部低盐区域土壤中的根系补偿性生长与水分吸收能力是盐分垂向非均匀分布条件下作物所受盐分胁迫得到缓解的关键因素。

由图 2 和表 3 可知,在番茄生育不同阶段,各处理上下层土壤盐分差异性随时间增大,即上层盐分下降,下层盐分上升,其原因主要是:①淡水灌溉淋洗使得土壤盐分向下运移。②秸秆隔层在灌溉间歇隔断了土壤毛管连续性,阻断了深层土壤盐分的向上运移。而在番茄不同生育阶段,根系分布状态也是动态变化的(图 3)。为了探究番茄不同生育阶段受到盐分胁迫对最终产量的影响规律,采用分阶段作物盐分生产函数,以不同生育期的土壤含盐量及根系干物质量数据为基础构建产量预测模型,并分析不同生育阶段盐分因子与番茄产量间的敏感指数。本研究分别以表层土壤含盐量、平均土壤含盐量以及根系加权平均土壤含盐量构建了 3 种盐分因子,结合 Steward 和 Jensen 函数公式对番茄产量进行预测。结果表明,同时考虑了作物根系和盐分分布的根系加权平均盐分因子对番茄产量的预测精度最高(表 4)。分析认为,除根系加权平均盐分因子外,其他几个盐分因子均存在一定的不足,如表层盐分因子,仅以隔离层以上土壤含盐量为控制因素,而未考虑下层土壤含盐量。实际上,在番茄生长过程中,尤其是苗期之后,番茄生长根系穿透秸秆隔层,

分布于下层土壤,此时下层土壤含盐量对番茄生长产生的影响不可忽视。而在预测番茄产量时单独考虑盆栽整体的土壤含盐量均值同样存在欠缺,以本研究盆栽番茄产量为例,处理 $T_{1:5}$ 和 $T_{3:3}$ 土壤含盐量均值均为 3 g/kg,但其果实产量分别为 1 562.0 g/株和 686.7 g/株,差异显著($P < 0.05$)。利用根系加权平均后的土壤盐分数据对番茄产量进行预测精度最高,与 BAZIHIZINA 等^[7] 的研究结果类似。分析认为,根系加权平均盐分因子可较为真实反映作物根系与土壤盐分间的直接接触程度,分布于高盐区域的作物根系总量越大,则根系加权平均盐分因子越高,作物受到的胁迫程度越大。这是其他诸如表层盐分因子以及平均盐分因子不具备的优势所在。同时,在盐分非均匀分布土壤环境中,低盐区作物根系的补偿性生长使得根系加权平均盐分含量降低,缓解作物所受盐分胁迫的同时提升作物产量,与本研究实测结果相一致:即,相较于盐分均布处理,盐分垂向非均匀分布处理下的番茄产量更高。

盐分生产函数中的敏感指数分析结果表明(表 5),不同生育阶段土壤盐分对最终产量的影响由大到小依次为坐果期、花期、收获期、苗期。坐果期为果实体积增大的关键时期,当作物受到较高的盐分胁迫时,其水分吸收及其他各方面生理生化过程均会受到抑制,从而影响果实最终产量。番茄生长花期也是植株营养生长较为快速的阶段,此阶段受到盐分胁迫会对株高、叶面积等指标造成影响^[5],从而对此后坐果期光合产物的累积造成抑制,影响最终产量,因此,番茄生长花期对盐分胁迫敏感性较高是合理的。收获期植株根、茎、叶等器官开始枯萎,营养生长逐渐停止,果实已基本成型,果实体积不再持续增长,此阶段主要是果实品质形成期,盐分胁迫对番茄种植最终产量的影响相对较小。番茄苗期受盐分胁迫对最终产量的影响最小,分析认为可能的原因是番茄移栽后统一灌溉 5 L 移苗水,以满足番茄生长需要,这使得盆栽上层土壤盐分得到一定的淋洗,盐分下降,且此阶段番茄根系浅,表层脱盐土壤使得番茄苗期水盐生长环境得到保证,此阶段盐分胁迫对最终产量的影响最小。

4 结束语

当土壤盐分均匀分布时,番茄根系干物质量与果实产量随土壤盐分含量升高而降低。受秸秆隔层隔断土壤垂向毛管连续性的影响,在灌溉水垂向淋洗的作用下,土壤盐分整体呈下移趋势。当土壤盐分在垂直方向上呈“上低下高”的非均匀分布时,处

于隔层以下高盐区土壤中的部分作物根系在盐胁迫的作用下将诱导上层低盐区作物根系出现补偿性生长,从而缓解作物所受整体盐分胁迫,最终促进作物增产。将根系加权平均土壤盐分因子代入 Jensen

函数后构建的分阶段作物盐分生产函数对番茄产量的预测精度最高,而番茄不同生育阶段敏感指数结果则表明,番茄生长坐果期的土壤含盐量对最终果实产量的影响最大。

参 考 文 献

- [1] 卢佳,邵光成,章坤,等. 水盐胁迫下根系提水作用对土壤盐分与番茄产量的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(9):249-257.
LU Jia, SHAO Guangcheng, ZHANG Kun, et al. Effects of root hydraulic lift on soil salt and tomato yield under water and salt stress[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):249-257. (in Chinese)
- [2] 李进海,李洋,RICARDO F O,等. 基于植物电信号的小麦苗期等渗干旱胁迫与盐胁迫辨识[J]. 农业机械学报,2021,52(7):231-236.
LI Jinhai, LI Yang, RICARDO F O, et al. Identification of isotonic drought stress and salt stress in wheat seedling based on plant electric signal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7):231-236. (in Chinese)
- [3] SUN W H, LIU X Y, WANG Y, et al. Effect of water stress on yield and nutrition quality of tomato plant overexpressing StAPX[J]. Biologia Plantarum, 2014, 58(1):99-104.
- [4] CHEN S, WANG Z C, GUO X P, et al. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on tomato photosynthesis and related physiological parameters[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249:120-130.
- [5] CHEN S, ZHANG Z Y, WANG Z C, et al. Effects of uneven vertical distribution of soil salinity under a buried straw layer on the growth, fruit yield, and fruit quality of tomato plants[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 203:131-142.
- [6] 郭相平,杨泊,王振昌,等. 秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移影响[J]. 灌溉排水学报,2016,35(5):22-27.
GUO Xiangping, YANG Bo, WANG Zhengchang, et al. Influence of straw interlayer on the water and salt movement of coastal saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5):22-27. (in Chinese)
- [7] BAZIHIZINA N, BARRETT-LENNARD E G, COLMER T D. Plant responses to heterogeneous salinity: growth of the halophyte *Atriplex nummularia* is determined by the root-weighted mean salinity of the root zone[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(18):6347-6358.
- [8] CHEN S, WANG Z C, ZHANG Z Y, et al. Effects of uneven vertical distribution of soil salinity on blossom-end rot of tomato fruit[J]. HortScience, 2017, 52(7):958-964.
- [9] CORREA J, POSTMA J A, WATT M, et al. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(21):6019-6034.
- [10] KONG X Q, LUO Z, DONG H Z, et al. H_2O_2 and ABA signaling are responsible for the increased Na^+ efflux and water uptake in *Gossypium hirsutum* L. roots in the non-saline side under non-uniform root zone salinity[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(8):2247-2261.
- [11] SUN J J, YANG G W, ZHANG W J, et al. Effects of heterogeneous salinity on growth, water uptake, and tissue ion concentrations of alfalfa[J]. Plant and Soil, 2016, 408(1-2):211-226.
- [12] LEI G, ZHAO Q, ZENG W, et al. Effect of vertically heterogeneous soil salinity on morphological characteristics, biomass accumulation, root distribution, and transpiration of sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. Journal of Animal and Plant Science, 2020, 30(6):1579-1595.
- [13] KUMAR M, SARANGI A, SINGH D K, et al. Wheat production functions under irrigated saline environment and foliar potassium fertigation[J]. Current Science, 2020, 118:1939-1945.
- [14] KUSCU H, TURHAN A, DEMIR A, et al. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment[J]. Agricultural Water Management, 2014, 133:92-103.
- [15] HAGHVERDI A, GHAHRAMAN B, LEIB B G, et al. Deriving data mining and regression based water-salinity production functions for spring wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 101:68-75.
- [16] 贺新. 水盐协同调控对作物产量与品质的影响机理及其应用研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
HE Xin. Influence mechanisms and the application of water-salt coordinated regulation technique on crop yield and quality [D]. Beijing:China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [17] STEWART J I, MISRA R D, PRUITT W O, et al. Irrigating corn and grain sorghum with a different water supply[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1975, 18(2):270-280.
- [18] JENSEN M E. Water consumption by agricultural plants[M]. New York: Academic Press, 1968.
- [19] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算[J]. 农业机械学报,2022,53(1):279-290,330.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Distribution characteristics of salinity and nutrients in salinized soil profile and estimation of salt migration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):279-290,330. (in Chinese)
- [20] BAZIHIZINA N, BARRETT-LENNARD E G, COLMER T D. Plant growth and physiology under heterogeneous salinity[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1):1-19.
- [21] 程贝,王卫华,吴忠东. 非均匀盐胁迫对番茄幼苗耐盐性的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(5):887-896.
CHENG Bei, WANG Weihua, WU Zhongdong. Effects of non-uniform salt stress on salt tolerance of tomato seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(5):887-896. (in Chinese)
- [22] XIONG X, LIU N, WEI Y Q, et al. Effects of non-uniform root zone salinity on growth, ion regulation, and antioxidant defense system in two alfalfa cultivars[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 132(1):434-444.
- [23] ZHANG H W, WANG R F, WANG H L, et al. Heterogeneous root zone salinity mitigates salt injury to *Sorghum bicolor* (L.) Moench in a split-root system[J]. PLoS One, 2019, 14(12):1932-6203.
- [24] PEREZ-PEREZ J G, DODD I C. Sap fluxes from different parts of the rootzone modulate xylem ABA concentration during partial rootzone drying and re-wetting[J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8):2315-2324.