

浅埋秸秆隔层对滨海盐土水盐运移及番茄生长的影响

黄 达^{1,2}, 陈 盛^{1*}, 王振昌¹, 陈朱叶³, 赵 虎⁴, 郭相平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, 广西 桂林 541004; 3.张家港市杨舍镇农业服务中心, 江苏 张家港 215600;
4.张家港市水务局, 江苏 张家港 215600)

摘 要:【目的】采取浅埋秸秆隔层方式, 抑制江苏滨海盐碱土急剧返盐, 促进作物生长及增产, 实现盐碱土改良、秸秆资源化利用和农业高效生产。【方法】利用番茄盆栽试验, 在土表以下 17 cm 处布设秸秆隔层, 设置不同上下层土壤含盐量(1:1、2:4、1:5、3:3), 研究浅埋秸秆隔层对江苏滨海盐碱土水盐运移的影响, 探究浅埋秸秆隔层条件下番茄的生长情况及生理响应特征。【结果】①浅埋秸秆隔层显著减少土壤水分消耗 5.7%~15.0%; 增强上层土壤灌溉淋洗作用, 上层土壤含盐量的降幅较无隔层处理高出 9.6%~24.5%; 抑制下层土壤返盐, 下层土壤含盐量的涨幅较无隔层处理低于 36.1%~155.0%。②浅埋秸秆隔层处理的上层根系分布数量明显增加, 根质量密度分别显著升高了 31.7%~40.0%, 根长密度大幅升高了 20.6%~35.1%, 根表面积密度明显升高 26.3%~26.6%; 下层根系呈更为细长的形态, 下层单位质量根系长度显著高出 29.9%~38.2%, 上下层根系平均直径的差值大幅高出 29.2%~48.3%。③浅埋秸秆隔层处理显著增加番茄地上部分干物质积累 3.3%~28.8%, 提高番茄产量 12.1%~80.7%, 提升灌溉水利用效率 19.1%~62.5%, 在高盐环境下的增益效果更佳。【结论】浅埋秸秆隔层可有效调控水盐运移, 提升脱盐效果, 缓解番茄受到的盐分胁迫, 促进番茄生长及产量提升, 具有重大应用意义和应用价值。

关 键 词: 番茄; 秸秆隔层; 水盐运移; 盐分胁迫; 补偿效应

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022377

OSID:



黄达, 陈盛, 王振昌, 等. 浅埋秸秆隔层对滨海盐土水盐运移及番茄生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 48-56.
HUANG Da, CHEN Sheng, WANG Zhenchang, et al. Ameliorating Salt Accumulation and Enhancing Tomato Growth by Shallow-burying a Crop Straw Layer in Coastal Saline Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 48-56.

0 引 言

【研究意义】科学合理的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。江苏滨海垦区农田在盐渍淤泥的基础上发育而成, 受海水型地下水的影响, 土壤具有含盐量高、养分量低等特点, 极大制约农业生产。虽采取合理的淋洗和灌排措施在短时间内可降低土壤盐分, 但由于江苏滨海垦区地下水位浅、风力强、土壤蒸发量大的特点, 深层土壤中含盐量较高, 且易在毛管作用下迅速上升, 重新积聚于土表, 对作物生长造成严重威胁^[1], 亟须解决。

【研究进展】研究发现, 利用砂石、陶粒、矿渣、人工合成材料等作为隔离层, 可破坏土壤毛管作用, 抑制土壤表层返盐, 缓解作物受到的盐分胁迫^[2-4]。

但上述材料需增加较多经济、人工投入, 并可能造成生态环境破坏, 不利于大范围推广应用。秸秆是农作物重要光合产物和最主要副产品, 资源丰富, 取材方便, 清洁环保且价格低廉, 利用潜力巨大。秸秆还田调控水盐运移、改良盐碱土是近年研究热点之一。国内外学者研究表明, 将秸秆埋设于土表以下形成隔离层, 在灌溉淋洗阶段, 秸秆隔层能够延缓土壤水分入渗, 增加盐分溶解时间, 提高淋洗脱盐效率; 而在潜水蒸发阶段, 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^[5-9]。同时, 秸秆隔层还田可显著改善土壤理化性质, 增加土壤肥力, 创造良好的土壤水肥气热环境, 促进微生物增殖, 有利于作物生长及增产^[10-12]。

为减小土方开挖和回填的工程量, 降低生产成本, 促进秸秆隔层还田推广与应用, 在保证作物生长前提下可采用浅埋秸秆隔层的方式, 适当减小隔层埋深。研究表明, 秸秆埋深 20~40 cm 即可有效调控滨海盐碱土的水盐运移, 促进作物生长^[13-15]。此外, 受浅层地下海水的影响, 江苏滨海盐碱土的深层土壤含盐量较高; 在灌溉淋洗和秸秆隔层的双重作用下, 表

收稿日期: 2022-07-08

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); 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: 黄达(1990-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事盐碱土改良和盐胁迫下的植物响应研究。E-mail: dada-wong@hhu.edu.cn

通信作者: 陈盛(1989-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事盐碱土改良和盐胁迫下的植物响应研究。E-mail: chens@hhu.edu.cn

层土壤含盐量一段时间内可维持较低水平，土壤盐分呈“上低下高”的非均匀分布状态，对作物生长、产量、根系分布及形态等造成一定影响^[5-6,16]。【切入点】当前，浅埋秸秆隔层调控盐碱土水盐运移的研究较多，但结合水盐分布特点的浅埋秸秆隔层对作物生理响应特征的相关研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究拟采用盆栽试验模拟江苏滨海盐碱土水盐分布特点，研究浅埋秸秆隔层对江苏滨海盐碱土水盐运移的影响，探究浅埋秸秆隔层条件下番茄的生长情况及生理响应特征，以期对盐碱土改良、秸秆资源化利用、农业高效生产等提供理论支撑和应用支持。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验时间为2014年4—11月和2016年8—11月，试验区位于江苏省南京市河海大学江宁节水园区大棚（东经 118°78′，北纬 31°91′，海拔 14.4 m）。大棚采用无滴膜覆盖，四周通风。试验用盆为聚乙烯塑料盆（上口径 30 cm，下口径 20 cm，高度 42 cm），底部预留直径 0.5 cm 的排水孔。试验秸秆为园区内种植并收割的水稻秸秆，自然风干后加工至长度约 5 cm 备用。试验用土为江苏东台滨海地区盐碱粉砂土，初始含盐量率为 9.1 g/kg。采用淡水将部分土壤充分淋洗脱盐至 0.1 g/kg，与原始土按比例混合配制不同含盐量（1、2、3、4、5 g/kg）土壤。为满足番茄生长需求，在不同含盐量的土壤中掺入适量基质、有机肥、无机肥等营养物质（见表 1），并充分均匀混合。调制后试验土壤的干体积质量为 0.94 g/cm³，田间持水率（ θ_f ）为 37%。试验作物选用番茄（*Solanum lycopersicon* L.var. Yazhoufenwang），生育期分为苗期、花期、坐果期和收获期 4 个阶段。于培养皿中培育番茄幼苗至第 3 片真叶后，挑选长势一致（株高约 15 cm）的健康幼苗移栽至试验盆中。害虫和杂草控制遵循当地种植惯例。

表 1 土壤掺入物种类及掺量

Table 1 Species and amount of soil additives					
种类	基质	有机肥	尿素	硫酸钾	磷酸二氢钾
掺量/(g kg ⁻¹)	32.50	2.50	0.326	0.13	0.38

注 基质的有机质量12%，腐殖酸量8%；有机肥中N 量、P₂O₅ 量、K₂O 量均为4%，有机质量≥45%。

1.2 试验设计

试验针对是否埋设秸秆隔层和上、下层土壤不同含盐量的试验处理开展研究。为模拟江苏滨海垦区农田土壤含盐量特点和不同淋洗程度，设置上、下层土壤含盐量分别为 1：5、2：4 和 3：3 的高盐处理（平均含盐量约 3 g/kg）；设置上、下层土壤含

盐量为 1：1 的低盐处理（平均含盐量约 1 g/kg）作为对照。各处理设置见表 2。每盆装填土壤质量为 21.5 kg，其中上、下层土壤质量分别为 8.6 kg 和 12.9 kg，厚度分别为 17 cm 和 20 cm，体积分别为 9 589 cm³ 和 7 893 cm³。埋设秸秆隔层的处理先装填下层土壤，均匀埋设秸秆隔层后装填上层土壤，埋深约 17 cm，每盆埋设秸秆质量为 50 g（约合 7.5 t/hm²），厚度约 3 cm。配合装土过程，将 5TE 探头（Decagon Devices INC., Pullman, WA, 美国）分别埋入上下层土壤中心位置，上层的探头埋设深度约 8.5 cm，埋设秸秆隔层处理的下层 5TE 探头埋设深度约 30 cm，未埋设秸秆处理的下层 5TE 探头埋设深度约 27 cm。番茄盆栽布置如图 1 所示。番茄苗期、花期和坐果期的控制灌溉上、下限分别为 θ_f 的 80%和 50%；收获期控制灌水上限不变，下限调整为 60% θ_f 。采用称质量法监测各处理土壤的含水率，对含水率低于控制灌水下限的处理进行灌水；根据控制灌水上限与含水率的差值，计算并统计各处理每次实际灌水量。采用量杯和电子天平称量各处理的相应灌水量后直接人工灌水，确保每次灌水均灌至控制灌溉上限。具体灌水时间和灌水量见图 2。灌溉后无排水处理，以防止盐分流失，造成盆栽土壤总含盐量发生差异变化。

表 2 番茄盆栽试验处理

Table 2 Treatment of tomato pot experiment					
年份	处理	是否埋设 秸秆隔层	上层土壤 含盐量/ (g kg ⁻¹)	下层土壤 含盐量/ (g kg ⁻¹)	各处理 重复数量
2014	T _{1:1}	是	1	1	12
	T _{1:1n}	否	1	1	12
	T _{2:4}	是	2	4	12
	T _{2:4n}	否	2	4	12
2016	T _{1:1}	是	1	1	4
	T _{1:1n}	否	1	1	4
	T _{1:5}	是	1	5	4
	T _{1:5n}	否	1	5	4
	T _{3:3}	是	3	3	4
	T _{3:3n}	否	3	3	4

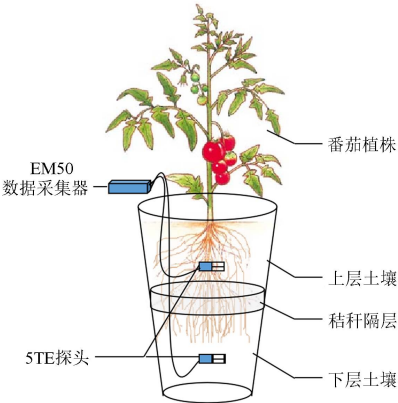


图 1 番茄盆栽示意图

Fig.1 Tomato pot diagram

1.3 指标测定及方法

1) 土壤水盐指标测定

2014 年番茄盆栽试验中, 每个处理随机选择 4 个重复进行水盐指标测定。采用 5TE 探头和 EM50 数据采集器 (Decagon Devices INC., Pullman, WA, 美国) 检测番茄生育期内土壤含水率 θ_v 和电导率 E_c 。5TE 探头的检测间隔为 10 min。根据相邻灌水之间上、下层土壤含水率 θ_v 变化情况, 计算每次灌水之间上、下层土壤耗水量, 统计番茄生育期内上、下层土壤总耗水量。利用烘干残渣法, 对所测得的电导率 E_c 进行率定, 得到电导率 E_c 与土壤含盐量 θ_s 的换算式 (1)。

$$\theta_s = 2.63E_c, \quad (1)$$

式中: θ_s 为土壤含盐量 (g/kg); E_c 为土壤电导率 (ms/cm)。

2) 番茄生长指标测定

2014 年试验测定番茄收获后番茄根系生长指标 (根系长度、根系表面积、根系干物质质量) 和地上部分生长指标 (果实产量、茎秆、叶片及果实干物质质量); 2016 年试验仅测定收获后番茄地上部分生长指标。番茄收获后分别采集番茄茎秆、叶片和果实, 去除杂质, 称量果实鲜质量即为果实产量, 茎、叶、果放入烘箱先 105 °C 杀青 1.0 h 再 75 °C 烘干 24 h 至恒质量, 冷却后称质量, 记录番茄各器官干物质质量; 截取上、下层土壤并分别放置于直径 1 mm 的过滤网格中, 利用水流冲洗去除土壤, 取出上、下层土壤中的根系, 尽量保持根系完整, 并注意细小根系的收集; 利用双面光源扫描仪扫描根系获取根系图片, 采用 Win-RHIZO 根系形态分析软件 (REGENT, 加拿大) 分析获取根系长度、根系表面积; 将根系 75 °C 烘干 24 h 至恒质量, 记录根系干物质质量。根据式 (2) 一式 (7), 计算番茄根质量密度 ρ_{qi} 、根长密度 ρ_{li} 、根表面积密度 ρ_{si} 、单位质量根系长度 l_i 、根系平均直径 R_i 和灌溉水利用效率 $IWUE$ 。

$$\rho_{qi} = \frac{Q_i}{V_i}, \quad (2)$$

$$\rho_{li} = \frac{L_i}{V_i}, \quad (3)$$

$$\rho_{si} = \frac{S_i}{V_i}, \quad (4)$$

$$l_i = \frac{L_i}{Q_i}, \quad (5)$$

$$R_i = \frac{S_i}{2\pi L_i}, \quad (6)$$

$$IWUE = \frac{Y_i}{I_i}, \quad (7)$$

式中: ρ_{qi} 为根质量密度 (g/cm³); ρ_{li} 为根长密度 (cm/cm³); ρ_{si} 为根表面积密度 (cm²/cm³); Q_i 为番茄根系总干物质质量 (g); L_i 为番茄根系长度 (cm); S_i 为番茄根系表面积 (cm²); V_i 为土层体积 (cm³); l_i 为番茄单位质量根系长度 (cm/g); R_i 为番茄根系平均直径 (cm); $IWUE$ 为灌溉水利用效率 (g/(mm 株)); Y_i 为番茄产量 (g/株); I_i 为番茄生育期内作物灌水量 (mm)。

1.4 数据处理

利用 Excel 进行数据处理分析和绘图。利用 SPSS 19 的单因素方差分析 (ANOVA) 确定数据间的差异性, 多重比较采用 Duncan 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 浅埋秸秆隔层对土壤水盐运移的影响

分析 2014 年不同处理的上、下层土壤水分消耗量情况 (表 3), 结合不同处理的上、下层土壤含水率变化趋势 (图 2), 结果表明, 浅埋秸秆隔层对上层耗水量影响不显著 ($P > 0.05$), 对下层耗水量则有显著影响 ($P < 0.05$)。浅埋秸秆隔层处理的 $T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$ 分别相较对应的无隔层处理的 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$ 的下层耗水量显著降低了 11.4%、31.5% ($P < 0.05$), 总耗水量则分别大幅减少了 5.7%、15.0% ($P < 0.05$)。表明浅埋秸秆隔层具有一定的保水作用, 提高下层土壤含水率, 减少了水分消耗。同时, 浅埋秸秆隔层对高盐处理 ($T_{2:4}$ 、 $T_{2:4n}$) 的下层耗水量和总耗水量的降幅明显大于低盐处理 ($T_{1:1}$ 、 $T_{1:1n}$) 的降幅, 浅埋秸秆隔层处理 $T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$ 的上下层耗水量占比差值较对应的无隔层处理增加了 5.8%、19.0%。表明浅埋秸秆隔层对高盐处理的水分消耗的增益效果更为明显。

表 3 不同处理的上下层土壤水分消耗量情况

Table 3 Water consumption of upper and lower soil under different treatments

处理	上层耗水量/mm	下层耗水量/mm	总耗水量/mm	上层耗水量占比/%	下层耗水量占比/%
$T_{1:1}$	380.6±44.8a	305.8±7.5b	686.4±2.6b	55.5±6.4b	44.5±1.0b
$T_{1:1n}$	382.7±14.5a	345.3±21.6a	728.0±18.6a	52.6±2.7c	47.4±2.7a
$T_{2:4}$	322.4±20.2b	208.0±29.6c	530.4±5.6d	60.8±3.2a	39.2±5.2bc
$T_{2:4n}$	320.3±20.6b	303.7±15.9a	624.0±2.2c	51.3±3.1c	48.7±2.45a

注 表中值为“均值±标准差”; 同一列数据的字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 字母相同表示处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 下同。耗水占比为该层耗水量占总耗水量的百分比。

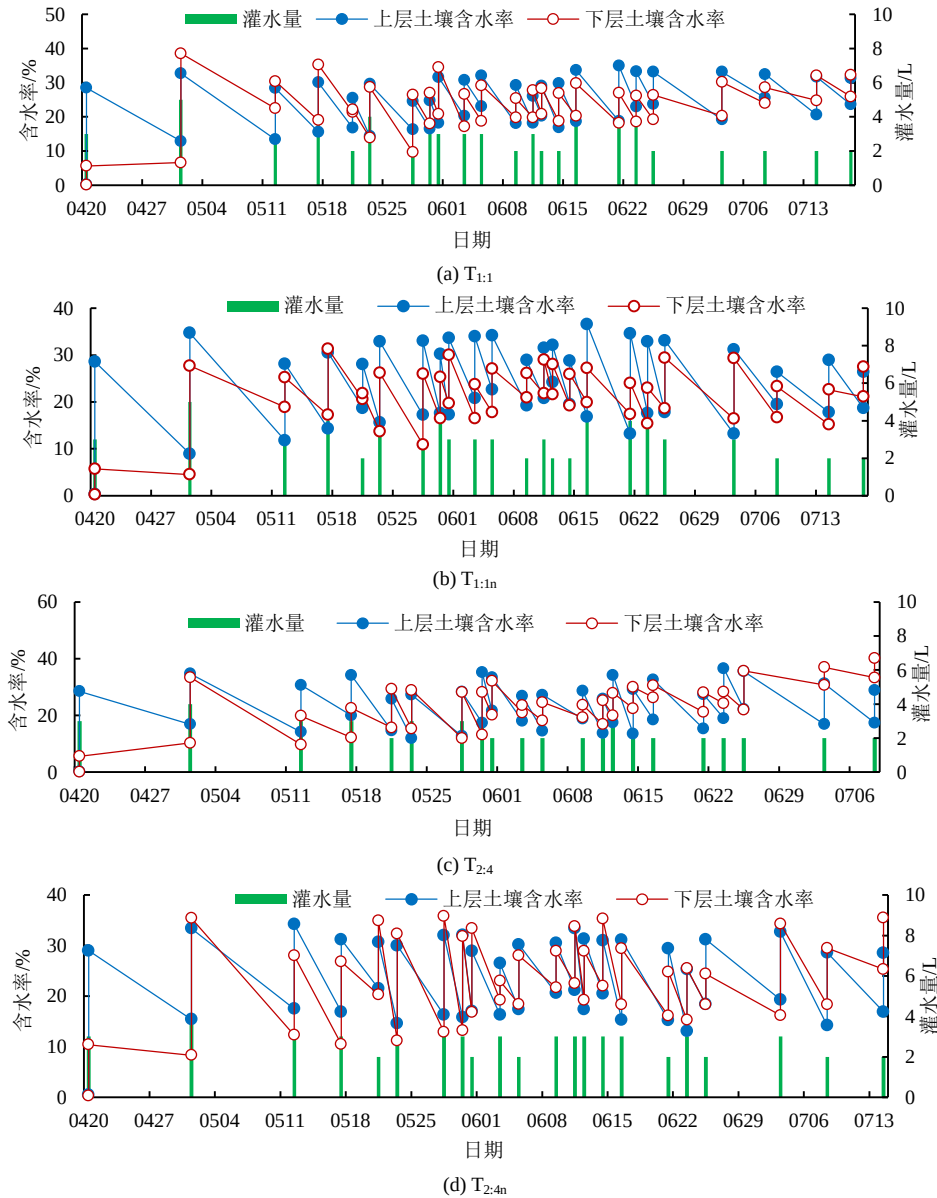


图 2 不同处理的上下层土壤含水率变化趋势

Fig.2 Variation trend of soil moisture content in upper and lower soil under different treatments

分析 2014 年不同处理的上、下层土壤含盐量变化趋势 (图 3), 随着灌溉淋洗和灌溉间歇蒸发, 上、下层土壤含盐量呈波动变化。总体上, 上层土壤含盐量呈逐步下降趋势, $T_{1:1}$ 、 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4}$ 、 $T_{2:4n}$ 处理的上层含盐量分别下降 89.2%、79.6%、65.5%、41.0%, 浅埋隔层处理的上层土壤含盐量降幅大于无隔层处

理的降幅, 表明浅埋隔层处理一定程度提升了盐分淋洗效果。下层土壤含盐量呈逐步上升趋势, $T_{1:1}$ 、 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4}$ 、 $T_{2:4n}$ 处理的下层含盐量分别上升 39.1%、75.2%、70.0%、225.0%, 浅埋秸秆隔层处理的下层土壤含盐量涨幅明显小于无隔层处理涨幅, 表明浅埋隔层处理具有一定阻止返盐的作用, 盐分积蓄在更深层的土壤中。

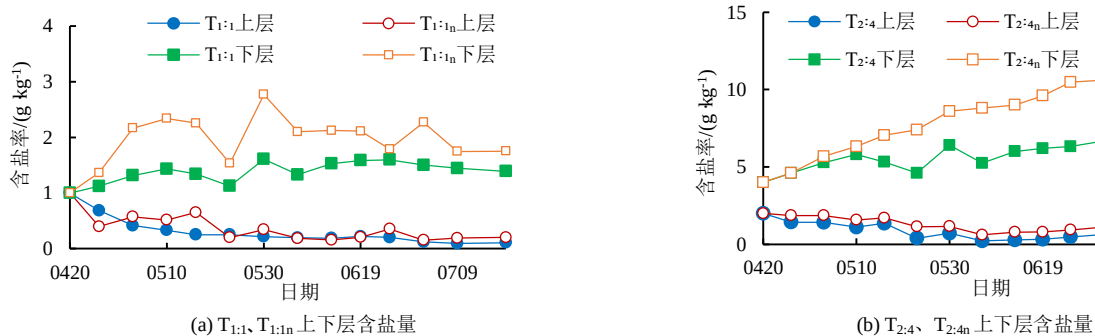


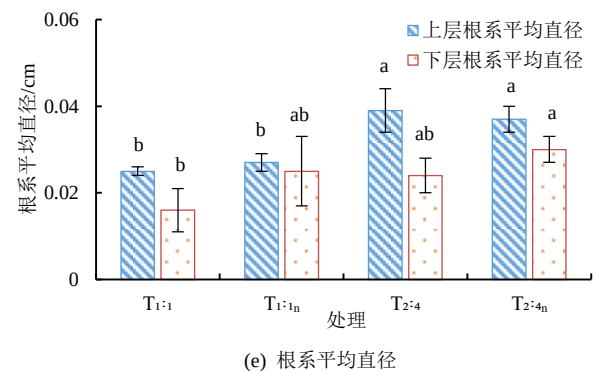
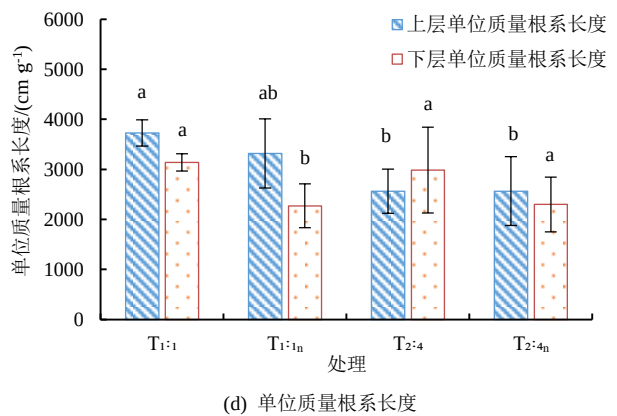
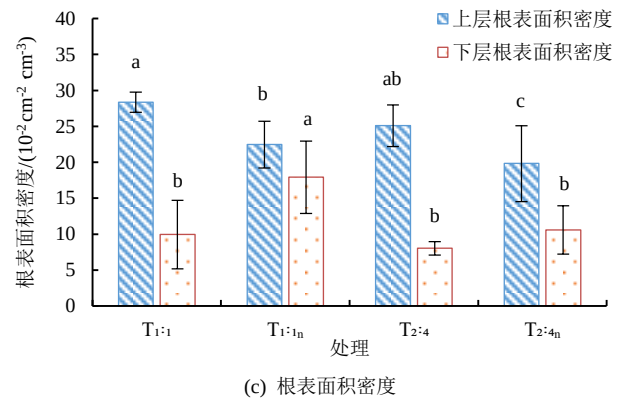
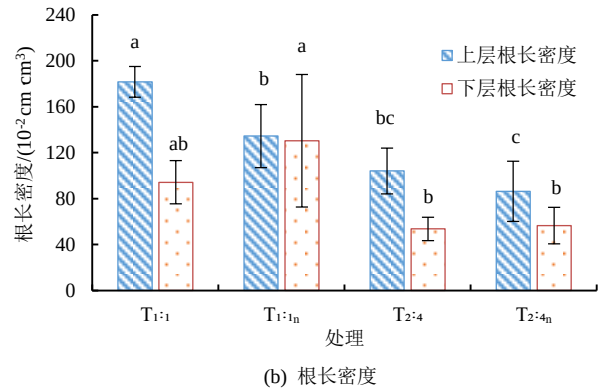
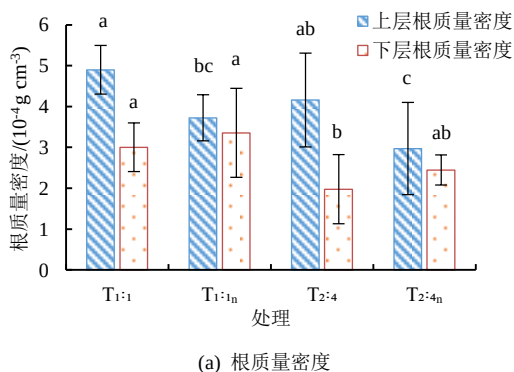
图 3 不同处理的上下层土壤含盐量变化趋势

Fig.3 Variation trend of salt content in upper and lower soil under different treatments

2.2 浅埋秸秆隔层对番茄生长的影响

1) 浅埋秸秆隔层对番茄根系生长指标的影响, 根质量密度、根长密度和根表面积密度是根系生物量和根系形态的重要指标, 可反映根系对土壤水分和养分的吸收能力。对比分析图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c), 上层根质量密度、根长密度和根表面积密度 3 个指标值均高于下层对应的指标值, 浅埋秸秆隔层处理 ($T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$) 较无隔层处理 ($T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$) 的 3 个指标值上下层之间相差更为明显。上层土壤中, 浅埋秸秆隔层的处理 $T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$ 较对应的无隔层处理 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$ 的根质量密度分别显著升高了 31.7% 和 40.0%, 根长密度大幅升高了 35.1% 和 20.6%, 根表面积密度明显升高了 26.3% 和 26.6%。除 $T_{2:4}$ 和 $T_{2:4n}$ 根长密度, 各处理之间指标差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。下层土壤中, $T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$ 较 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$ 的根质量密度、根长密度和根表面积密度指标值均有一定程度下降, 但处理间差异并不显著 ($P > 0.05$)。表明浅埋秸秆隔层促使更多番茄根系分布于上层土壤中。

单位质量根系长度是代表植物对土壤资源竞争力的形态指标, 单位质量根系长度越大, 其潜在吸收水分和养分的能力越强。对比不同处理的单位质量根系长度 (图 4 (d)), 浅埋秸秆隔层处理 ($T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$) 较无隔层处理 ($T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$) 的上层单位质量根系长度差异不显著 ($P > 0.05$), 下层单位质量根系长度则分别显著高出 38.2% 和 29.9% ($P < 0.05$)。表明浅埋秸秆隔层条件下, 番茄下层根系更为细长, 根系比表面积更大, 根系吸收能力更强。根系平均直径可直接反映根系的粗细程度, 亦与根系吸收能力密切相关, 两者通常呈正相关关系。分析不同处理的根系平均直径 (图 4 (e)), 浅埋秸秆隔层对上、下层根系平均直径的影响均不显著 ($P > 0.05$), 但浅埋秸秆隔层处理的上、下层之间的根系平均直径差值明显大于无隔层处理的差值, $T_{1:1}$ 、 $T_{2:4}$ 上下层之间根系平均直径的差值分别相比 $T_{1:1n}$ 、 $T_{2:4n}$ 高出 48.3% 和 29.2%。表明浅埋秸秆隔层使较粗根系分布于上层土壤, 下层土壤则以更细的根系为主。



注 同一指标的字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 字母相同表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

图 4 不同处理的番茄根系生长指标

Fig.4 Root growth index of tomato under different treatments

2) 浅埋秸秆隔层对番茄地上部分生长指标的影响, 比较 2014 年和 2016 年番茄盆栽试验不同处理的番茄茎秆、叶片及果实干物质质量和地上部分总干物质质量 (表 4), 浅埋秸秆隔层处理较无隔层处理, 番茄

茎、叶、果实干物质质量均有不同程度增加。对比不同含盐量处理各器官和地上部分总干物质质量增量, 高盐处理 ($T_{1:5}$ 、 $T_{2:4}$ 、 $T_{3:3}$) 的增量明显高于低盐处理 ($T_{1:1}$) 的增量。以地上部分总干物质质量增量为例, 高盐处理 ($T_{1:5}$ 、 $T_{2:4}$ 、 $T_{3:3}$) 浅埋秸秆较未埋秸秆分别显著增加了 18.7%、24.0% 和 28.8% ($P<0.05$),

而低盐处理 ($T_{1:1}$) 增量仅为 3.3% 和 3.5%, 差异并不显著 ($P>0.05$)。表明高含盐量加剧作物遭受的盐分胁迫, 浅埋秸秆隔层可减轻盐分胁迫, 对番茄地上部分各器官生长及干物质积累的增益效果更为明显。

表 4 不同处理的番茄地上部分干物质质量

Table 4 Dry matter quality of tomato aboveground under different treatments

年份	处理	茎秆干物质 量/(g 株 ⁻¹)	茎秆干物质 增量/%	叶片干物质 量/(g 株 ⁻¹)	叶片干物质 量增量/%	果实干物质 量/(g 株 ⁻¹)	果实干物质 量增量/%	地上部分 总干物质/ (g 株 ⁻¹)	地上部分 总干物质 量增量/%
2014	$T_{1:1}$	35.8±4.3a	9.5	58.2±5.5a	8.8	101.9±16.6a	4.6	195.8±16.6a	3.3
	$T_{1:1n}$	32.7±4.8ab		53.5±4.7a		97.4±5.4ab		189.6±6.5a	
	$T_{2:4}$	28.4±1.8b	11.4	41.0±8.1bc	20.9	72.5±15.1b	32.5	141.9±21.0b	24.0
	$T_{2:4n}$	25.5±3.9c		33.9±2.4c		54.7±6.5c		114.4±20.7c	
2016	$T_{1:1}$	46.0±5.0a	0.4	68.8±18.9a	1.5	91.0±7.6a	6.7	205.8±15.7a	3.5
	$T_{1:1n}$	45.8±4.8a		67.8±12.5a		85.3±15.5ab		198.8±28.3a	
	$T_{1:5}$	39.3±4.3ab	11.3	57.3±5.2ab	25.9	84.1±7.1ab	17.8	180.6±5.4a	18.7
	$T_{1:5n}$	35.3±5.5b		45.5±8.2bc		71.4±8.0bc		152.1±15.6b	
	$T_{3:3}$	38.0±1.4b	18.8	50.3±3.4bc	32.0	65.7±14.1cd	32.7	153.9±11.7b	28.8
	$T_{3:3n}$	32.0±2.4c		38.1±3.5c		49.5±14.0d		119.5±20.8c	

注 各指标增量为相同土壤含盐量处理的浅埋秸秆隔层处理较无隔层处理之间的指标增加百分率; 下同。

对比分析 2014 年和 2016 年不同处理的番茄产量 (表 5), 土壤含盐量对番茄产量影响较大, 高盐处理的番茄产量显著低于低盐处理 ($P<0.05$)。浅埋秸秆隔层处理较无隔层处理的番茄产量均有不同程度增加, 且高盐处理的增量明显高于低盐处理, 其中 $T_{3:3}$ 处理较 $T_{3:3n}$ 处理的番茄产量大幅增加 80.7% ($P<0.05$)。表明在较高土壤含盐量条件下, 浅埋秸秆隔层可有效缓解番茄受到的盐分胁迫, 利于作物生长和产量提升。

表 5 不同处理的番茄产量

Table 5 Yield of tomato under different treatments

年份	处理	产量/(g 株 ⁻¹)	产量增量/%
2014	$T_{1:1}$	3 838±825a	12.1
	$T_{1:1n}$	3 424±161a	
	$T_{2:4}$	2 737±513bc	37.4
	$T_{2:4n}$	1 992±912c	
2016	$T_{1:1}$	1 013±125a	14.1
	$T_{1:1n}$	888±274a	
	$T_{1:5}$	693±114b	28.1
	$T_{1:5n}$	541±137b	
	$T_{3:3}$	553±117b	80.7
	$T_{3:3n}$	306±82c	

比较 2014 年和 2016 年不同处理的番茄生长水分利用效率 $IWUE$ (表 6), 浅埋秸秆隔层处理较无隔层处理的番茄 $IWUE$ 均有不同程度提升, 高盐处理 ($T_{2:4}$ 、 $T_{1:5}$ 、 $T_{3:3}$) 的番茄 $IWUE$ 增量明显高于低盐处理 ($T_{1:1}$) 的番茄 $IWUE$ 增量。 $T_{1:1}$ 处理的番茄 $IWUE$ 在 2014 年和 2016 年浅埋秸秆隔层较无隔层处理分别提升 19.1% 和 21.8%, 均未达显著水平 ($P>0.05$);

$T_{2:4}$ 、 $T_{1:5}$ 、 $T_{3:3}$ 处理的番茄 $IWUE$ 则分别显著提升 62.5%、33.3%、40.1%, 是否浅埋秸秆之间差异显著 ($P<0.05$), 较低盐处理大幅增加了 43.4%、11.5%、18.3%。表明浅埋秸秆隔层对高盐条件下番茄 $IWUE$ 的提升效果更加明显。

表 6 不同处理的灌溉水分利用效率

Table 6 $IWUE$ of tomato under different treatments

年份	处理	$IWUE$ /(g mm ⁻¹ 株 ⁻¹)	$IWUE$ 增量/%
2014	$T_{1:1}$	5.6±0.3a	19.1
	$T_{1:1n}$	4.7±0.1a	
	$T_{2:4}$	5.2±0.9a	62.5
	$T_{2:4n}$	3.2±0.7b	
2016	$T_{1:1}$	4.6±0.2a	21.8
	$T_{1:1n}$	3.8±0.6ab	
	$T_{1:5}$	3.6±0.2b	33.3
	$T_{1:5n}$	2.7±0.5cd	
	$T_{3:3}$	3.1±0.7bc	40.1
	$T_{3:3n}$	2.2±0.3d	

3 讨论

3.1 浅埋秸秆隔层对土壤水盐运移的影响

本研究结果表明, 浅埋秸秆隔层对上层耗水量影响不显著 ($P>0.05$), 但对下层耗水量则有显著影响 ($P<0.05$), 浅埋秸秆隔层处理的下层耗水量显著降低了 11.4% 和 31.5% ($P<0.05$)。这与陆培榕等^[17]关于秸秆埋深对盐渍土水盐分布的研究结果一致。表明浅埋秸秆隔层具有一定保水作用, 该作用对秸秆隔层以下的土壤影响更为显著, 浅埋秸秆隔层保水作用发挥的范围更大。许多学者对秸秆隔层的保

水作用机理进行了较深入的研究, 结论基本一致。在灌溉入渗阶段, 秸秆隔层与上覆土层存在孔隙差异, 土-秸界面处水势差逆向, 延缓湿润锋推进速度, 秸秆隔层表现出阻水减渗的效果^[18]。这与土壤水分入渗过程中受到的“毛细阻滞”有关, 在秸秆层含水率较低时, 其导水率显著低于上层土壤, 穿透土-秸界面的水通量减小, 甚至在灌溉定额较小的情况下, 秸秆隔层不存在有效导水能力, 抑制了水分入渗^[19]。当上层土壤含水率持续升高突破毛细阻滞界面后, 水流湿润锋进入秸秆隔层, 随后土壤水分入渗所需突破的异质层界面转变为秸秆隔层与深层土体界面, 即由大孔隙度介质向小孔隙度介质运移。含水率的上升使得秸秆隔层导水率升高, 最终超越下层土壤, 对从秸秆层向下层土壤入渗的水分产生二次阻碍^[20], 即所谓的“水力阻滞”。在潜水蒸发阶段, 秸秆隔层的铺设能够有效隔断土壤毛管连续性, 当地下水上升至隔层下界面后, 只能以水汽的形式扩散上升, 显著降低了潜水蒸发能力^[21]。由于秸秆隔层的保水作用, 浅埋秸秆隔层处理较无隔层处理总耗水量显著减少了 5.7%和 15.0% ($P < 0.05$), 起到一定节水效果。此外, 本研究发现浅埋秸秆隔层对高盐处理的水分消耗的增益效果更为明显。这可能是浅埋秸秆处理影响了作物根系吸水, 尤其在高盐环境下, 番茄可能产生了一定生理调节反应, 提升上层根系的吸水量, 以保证作物生长需求, 从而增加了上层耗水占比, 增大了上下层耗水量占比差值。

本研究发现, 浅埋秸秆隔层处理的上层土壤含盐量降幅大于无隔层处理的降幅, 下层土壤含盐量涨幅明显小于无隔层处理涨幅, 表明浅埋秸秆隔层可提升上层土壤的盐分淋洗效果, 抑制下层土壤返盐。这与前人研究结果^[20-22]基本一致。土壤盐分运移和水分运移密切相关, 土壤水分是盐分运动的驱动力和重要载体, 秸秆还田通过影响土壤水分运移而间接影响盐分运移。在淋洗脱盐的过程中, 秸秆隔层能够延缓土壤水分入渗, 促进了土壤中可溶性盐离子的交换和溶解, 待重力水完全下渗后, 带走更多的盐分离子, 提升淋洗脱盐效果及水分利用效率^[20]。而在蒸发上升阶段, 利用秸秆隔层隔断毛管水上升路径, 可抑制地下水或深层土壤中的盐分向上运移, 防止土壤返盐^[22]。

3.2 浅埋秸秆隔层对番茄生长的影响

《CELL》综述文章表明, 植物可巧妙整合土壤中的多重胁迫因子信息(如盐分胁迫、氮素缺乏等), 通过激素及小分子肽在细胞间和器官间传递信号, 调控生长、发育及代谢等过程, 应对外界多种环境胁迫, 提升植物对胁迫的耐受能力, 维持植物的正常生长^[23]。例如, 当土壤中水盐呈非均匀分布时, 根系倾向于向

含水率较高、含盐量低的区域生长, 具有“趋水避盐”性^[24-25]。研究表明^[5-6], 当番茄根系处于在垂直方向的盐分不均匀分布, 相对于均匀分布处理, 处于含盐量较低的根系出现补偿性生长和补偿性吸水的补偿效应, 以保证作物生长需求。本研究结果表明, 浅埋秸秆隔层增加了番茄上层土壤的根质量密度、根长密度和根表面积密度, 增加上层根系分布比例。分析其原因, 可能是由于, 一方面, 浅埋秸秆隔层形成土体内部异质层, 改变了土壤结构的连续性, 增大番茄根系下穿难度, 阻碍了番茄根系向下发展, 从而减少了下层土壤中根系分布; 另一方面, 上下层土壤水盐非均匀分布迫使番茄产生生理调节, 出现补偿效应, 更多根系富集于相对“高水低盐”上层土壤中, 以吸收更多水分和养分, 满足番茄生长需求。一定程度论证了上述关于“浅埋秸秆处理提升上层根系的吸水量, 增加了上层耗水占比, 增大了上下层耗水量占比差值”的推断。此外, 浅埋秸秆隔层条件下, 下层土壤中的番茄根系呈现更为细长的形态。这可能是下层根系处于相对“低水高盐”的不利胁迫环境, 番茄植株产生生理调节, 也出现了补偿效应, 下层根系通过增加单位质量根系长度, 增大根系比表面积, 增加根系与土壤介质的接触面积, 增强根系吸收水分和养分的能力, 以保证作物生长需求。

本研究结果表明, 浅埋秸秆隔层可显著增加番茄地上部分干物质积累, 提高番茄产量, 提升番茄水分利用效率, 在高盐环境下的增益效果更佳。结合水盐运移的结果与分析, 其原因可能是由于秸秆隔层良好的保水控盐作用, 提升了土壤脱盐效果, 创造了更适宜的土壤水盐条件, 更利于番茄生长。同时, 盐分胁迫和水盐非均质分布条件下, 浅埋秸秆处理的番茄的补偿效应更为显著, 上层根系分布比例和下层根系吸收能力显著高于无秸秆隔层处理, 从而提升作物对胁迫的耐受能力, 促进作物生长及产量提高, 降低作物所受盐分胁迫影响。综上所述, 埋深 17 cm 的浅埋秸秆隔层可有效调控水盐运移, 提升脱盐效果, 缓解番茄受到的盐分胁迫, 实现番茄促长及增产。

本研究采用盆栽试验, 通过设置不同上、下层含盐量情况, 一定程度上模拟江苏滨海田间的土壤水盐情况, 探究浅埋秸秆隔层处理对江苏滨海盐碱土水盐运移及作物生理反应机制。但是, 由于江苏滨海垦区地下水位较浅且易受降雨、灌溉影响, 水位波动较大, 浅层地下海水对土壤水盐运移和作物生长可能造成较大影响。考虑设置补充咸水的处理可能会由于水分蒸发不均导致盐分上升不一致, 造成盆栽土壤总含盐量发生差异变化, 对研究造成不可控的影响, 本研究未设置马氏瓶等装置进行补充咸水来模拟浅层地下

海水,与江苏滨海盐碱土农田可能存在一定差别。在今后研究中,可开展江苏滨海农田现场小区或者大田试验,进一步研究浅埋隔层处理对实际田间土壤的水盐运移和作物生长影响,以期浅埋秸秆隔层的实际应用提供更有力的支撑。

4 结 论

1) 浅埋秸秆隔层具有保水控盐的作用,浅埋秸秆隔层显著减少土壤水分消耗 5.7%~15.0%;增强上层土壤灌溉淋洗作用,上层土壤含盐量的降幅较无秸秆隔层处理高出 9.6%~24.5%;抑制下层土壤返盐,下层土壤含盐量的涨幅较无秸秆隔层处理低于 36.1%~155.0%。

2) 盐胁迫和水盐非均质分布条件下,浅埋秸秆隔层处理的番茄根系补偿效应更为显著。浅埋秸秆隔层处理的上层根系分布数量明显增加,根质量密度分别显著升高了 31.7%~40.0%,根长密度大幅升高了 20.6%~35.1%,根表面积密度明显升高 26.3%~26.6%;下层根系呈现更为细长的形态,浅埋秸秆隔层处理的下层单位质量根系长度显著高出 29.9%~38.2%,上下层根系平均直径的差值大幅高出 29.2%~48.3%。

3) 浅埋秸秆隔层处理显著增加番茄地上部分干物质积累 3.3%~28.8%,提高番茄产量 12.1%~80.7%,提升灌溉水利用效率 19.1%~62.5%。其中,在高盐胁迫环境下浅埋秸秆隔层的增益效果更佳,高盐处理较低盐处理浅埋秸秆处理的地上部分总干物质质量分别大幅增加了 15.2%~25.3%,产量提高了 14.0%~66.6%,灌溉水利用效率提升了 11.5%~43.4%。

参考文献:

- [1] CHEN Xiulong, KANG Yaohu, WAN Shuqin, et al. Influence of mulches on urban vegetation construction in coastal saline land under drip irrigation in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 145-155.
- [2] 赵文举, 马宏, 范严伟, 等. 不同覆盖模式下砂壤土水盐运移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 331-336.
- [3] ZHAO Wenju, MA Hong, FAN Yanwei, et al. Study on the characteristics of water and salt transport in sandy loam soil under different mulching models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 331-336.
- [4] 王琳琳, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1 388-1 398.
- [5] WANG Linlin, LI Suyan, SUN Xiangyang, et al. Application of salt-isolation materials to a coastal region: Effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1 388-1 398.
- [6] 吕雯, 孙兆军, 陈小莉, 等. 地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土水盐特性提高油菜产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 125-133.
- [7] LYU Wen, SUN Zhaojun, CHEN Xiaoli, et al. Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of Takyr

- [8] Solonchets and yield of oil sunflower[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 125-133.
- [9] CHEN Sheng, ZHANG Zhanyu, WANG Zhenchang, 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.
- [10] CHEN Sheng, WANG Zhenchang, GUO Xiangping, et al. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on tomato photosynthesis and related physiological parameters[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 120-130.
- [11] ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, ZHAO Yonggan, et al. Water and salt exchange flux and mechanism in a dry saline soil amended with buried straw of varying thicknesses[J]. *Geoderma*, 2020, 365: 114-123.
- [12] 吴烽, 张林瑄, 郭相平, 等. 秸秆隔层及不同灌水上限对土壤水氮分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 73-78.
- [13] WU Feng, ZHANG Shuxuan, GUO Xiangping, et al. Effects of straw interlayers and different irrigation limits on soil water and nitrogen distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(6): 73-78.
- [14] 张宏媛, 逢焕成, 卢闯, 等. CT扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 114-122.
- [15] ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, LU Chuang, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 114-122.
- [16] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 9-18.
- [17] ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, YAN Jun, et al. Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 9-18.
- [18] HUANG Tiantian, YANG Ning, LU Chen, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105-171.
- [19] 陈盛, 黄达, 章二子, 等. 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤无机氮量及酶活性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(5): 45-54.
- [20] CHEN Sheng, HUANG Da, ZHANG Erzi, et al. The effects of straw incorporation depth on nitrogen dynamics and enzymatic activities in soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(5): 45-54.
- [21] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 等. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(5): 885-889.
- [22] QIAO Hailong, LIU Xiaojing, LI Weiqiang, et al. Effect of deep straw mulching on soil water and salt movement and wheat growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5): 885-889.
- [23] 杨东, 李新举, 孔欣欣. 不同秸秆还田方式对滨海盐渍土水盐运动的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 74-78.
- [24] YANG Dong, LI Xinju, KONG Xinxin. Effects of different straw returning modes on the water and salt movement in the coastal saline soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(6): 74-78.
- [25] 李美荣, 杨劲松, 吴亚坤, 等. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(6): 1 101-1 107.
- [26] LI Furong, YANG Jinsong, WU Yakun, et al. Effects of straw mulch at different depths on water-salt dynamic changes of coastal saline soil in north Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1 101-1 107.
- [27] BAZIHIZINA Nadia, BARRETT-LENNARD Edward G, COLMER Timothy 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): 6 347-6 358.
- [28] 陆培榕, 张展羽, 冯根祥, 等. 秸秆排水体埋深对盐渍土水盐分布的影响及排水抑盐效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 115-121.
- [29] LU Peirong, ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, et al. Effect of straw

- draining piece depth in soil on water-salt distribution in saline soil and its drainage-salt inhibiting performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 115-121.
- [18] 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 Zhenchang, et al. Influence of straw interlayer on the water and salt movement of costal saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5): 22-27.
- [19] 张万锋, 杨树青, 靳亚红, 等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 228-237.
- ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, JIN Yahong, et al. Effects of irrigation amount on soil water and salt distribution and summer maize yield under deeply buried straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 228-237.
- [20] ZHAO Yonggan, WANG Shujuan, LI Yan, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. Geoderma, 2019, 352: 13-21.
- [21] ZHAO Yonggan, LI Yuyi, WANG Jing, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363-370.
- [22] ZHANG Zemin, ZHANG Zhanyu, LU Peirong, et al. Soil water-salt dynamics and maize growth as affected by cutting length of topsoil incorporation straw under brackish water irrigation[J]. Agronomy, 2020, 10(2): 246.
- [23] CHAIWANON Juthamas, WANG Wenfei, ZHU Jiaying, et al. Information integration and communication in plant growth regulation[J]. Cell, 2016, 164(6): 1 257-1 268.
- [24] BAZIHIZINA Nadia, COLMER Timothy D, Barrett-Lennard Edward G. Response to non-uniform salinity in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia*: Growth, photosynthesis, water relations and tissue ion concentrations[J]. Annals of Botany, 2009, 104(4): 737-745.
- [25] FLORES Pilar, ANGELES Botella, MARTÍNEZ Vicente, et al. Response to salinity of tomato seedlings with a split-root system: Nitrate uptake and reduction[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(1): 177-187.

Ameliorating Salt Accumulation and Enhancing Tomato Growth by Shallow-burying a Crop Straw Layer in Coastal Saline Soil

HUANG Da^{1,2}, CHEN Sheng^{1*}, WANG Zhenchang¹, CHEN Zhuye³, ZHAO Hu⁴, GUO Xiangping¹

(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;

3. Zhangjiagang Yangshe Town Agricultural Service Center, Zhangjiagang 215600, China;

4. Zhangjiagang Municipal Water Bureau, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: 【Objective】 Salt accumulation in the proximity of soil surface and poor soil structure are a problem facing agricultural production in coastal regions. The objective of this paper is to explore the potential of using a shallow-buried straw layer to reduce solute ascent to ameliorate salt stresses to crops. 【Method】 The experiment was conducted in pots with tomato used as the model plant. The straw was buried at the depth of 17cm, with the ratio of salt content in the soil overlying and underlying the straw layer being 1 : 1, 2 : 4, 1 : 5, or 3 : 3. In each treatment, we measured the variation in soil water and salt, as well as growth and physiological changes of the tomato. 【Result】 Compared to the control (without straw layer), the shallow-buried straw layer significantly reduced soil water loss by 5.7% to 15.0%, and salt content in the upper soil layer by 9.6% to 24.5%, depending on the initial soil salt content and distribution; it also increased the number of roots in the upper soil layer and root mass density, root length density and root surface area by 31.7% to 40.0%, 20.6% to 35.1%, and 26.3% to 26.6%, respectively. It was found that the straw treatment enhanced dry matter accumulation in the above-ground part by 3.3% to 28.8%, increased tomato yield by 12.1% to 80.7%, and improved irrigation water utilization efficiency by 19.1% to 62.5%, compared to the control. 【Conclusion】 Our results show that shallow-burying a straw layer at the depth of 17 cm can effectively slow down soil salt migration, alleviate salt stress to the tomato, and promote tomato growth and yield. It has a potential application for other crops grown in salinized coastal soils.

Key words: tomato; straw interlayer; water and salt migration; salt stress; compensation effect

责任编辑: 赵宇龙