

秸秆覆盖对滴灌棉花土壤水盐运移及根系分布的影响*

张金珠¹ 王振华¹ 虎胆·吐马尔白^{2**}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院 石河子 832000; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院 乌鲁木齐 830052)

摘要 干旱区棉田残膜污染日益严重, 秸秆覆盖能从根本上杜绝农田残膜增量。为探索秸秆覆盖代替塑料薄膜与滴灌结合的可行性, 需了解秸秆覆盖对滴灌棉花土壤水盐分布及棉花根系的影响特点, 同时探索耕作层以下 30 cm 处埋设一层秸秆进行深层秸秆覆盖与滴灌结合的效果。本文采用测坑试验研究了 3 种秸秆覆盖方式(表层覆盖、30 cm 深层覆盖和无覆盖)与滴灌结合在 2 种土壤条件下(非盐碱土和盐碱土), 棉花根系分布稳定后的絮期土壤水盐运移及棉花根系分布特征。结果表明: 表层覆盖对于土壤整体保水性较好, 能有效抑制耕层水分散失和盐分聚集; 30 cm 深层覆盖整体保水性优于无覆盖, 相对表层覆盖仅在秸秆层以下靠近滴灌带的有限范围内具有优势, 并显著提高耕层以下土壤水分含量, 但在棉花絮期对于盐分抑制作用不明显。秸秆覆盖通过对水盐运动的影响而显著影响棉花根系分布, 尤其对深层根系分布影响更大。非盐碱土条件下, 0~28 cm 土层, 无覆盖处理根长密度、根重密度、根长密度比重均最大, 表层覆盖根长密度最小, 但根重比重最大, 30 cm 深层覆盖根重密度最小; 在 28~70 cm 土层, 30 cm 深层覆盖根长密度最大, 表层覆盖根长密度最小, 但根长密度比重最大, 无覆盖根长密度比重最小, 其中在 28~56 cm 土层 30 cm 深层覆盖根重密度和根重比重均最大。盐碱土条件下, 0~28 cm 土层, 表层覆盖与 30 cm 深层覆盖根长密度和根长比重均高于无覆盖处理, 同时表层覆盖根重密度最高, 30 cm 深层覆盖根重密度和根重比重均最低; 在 28~70 cm 土层情况相反, 30 cm 深层覆盖处理根重比重最大, 但根重密度最小。说明表层覆盖可促进非盐碱土及盐碱土耕作层根系发育, 30 cm 深层覆盖限制上层根系发育, 但促进 30 cm 以下土层根系发育, 在盐碱逆境下秸秆覆盖可促进根系向更细更长方面发育。秸秆覆盖与滴灌结合在干旱区具有良好应用前景。

关键词 秸秆覆盖 滴灌 棉花 水盐运移 根系分布

中图分类号: S278 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)12-1467-10

Influence of straw mulching on soil water/salt movement and cotton root distribution under drip irrigation

ZHANG Jin-Zhu¹, WANG Zhen-Hua¹, Hudan·TUMAREBI²

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract With wide application of plastic mulching in cotton fields in the arid regions of China, residual plastic films have become a growing concern. Compared with plastic mulching, straw mulching has been noted to safely avoid the residual problem associated with plastic mulching. To explore the feasibility of replacing plastic mulching with straw mulching in a combined mulching and drip irrigation system, the effects of straw mulching on distributions of soil water and salt and cotton root system in drip-irrigated cotton fields were evaluated in this study. In addition, the effect of deep straw mulching (buried a layer of straw at 30 cm soil depth) coupled with drip irrigation was evaluated. Pit test experiments were carried out on two soil types (non-saline and saline-alkali soils) with three straw mulching treatments — surface mulching, deep mulching and non-mulching — coupled with drip irrigation. Samples were taken at cotton batt stage when the distribution of root systems was stable, followed by analyses of water, salt and root

* 新疆自治区“十二五”重大科技专项(201130103-3)、国家自然科学基金项目(51069015)和现代节水灌溉兵团重点实验室(石河子大学)开放基金项目(JSJG2011001)资助

** 通讯作者: 虎胆·吐马尔白(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水土壤水盐运移理论及节水灌溉理论研究。E-mail: hudant@hotmail.com

张金珠(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xjshzzjz@sina.cn

收稿日期: 2013-06-24 接受日期: 2013-09-29

distribution characteristics. The results showed that surface mulching was fairly effective in soil moisture conservation and effectively prevented water loss via evaporation and salt accumulation in the plough layer. Deep mulching was generally better in effect regarding water conservation than non-mulching. Deep mulching was only advantageous over surface mulching in soil areas near irrigation lines under the straw layer. While deep mulching significantly improved soil moisture content below the plough layer, it had no apparently effect on salt at the cotton batt stage. Straw mulching significantly influenced the distribution of cotton root systems, especially in deep soil layers, by controlling the movements of water and salt. For non-saline soils, in the 0–28 cm soil layer, the highest root length density, root weight density and root length density proportion occurred under non-mulching. Although surface mulching had the smallest root length density, it also had the largest proportion of root weight density. Moreover, the lowest root weight density was under deep mulching. Deep mulching had the highest root length density in the 28–70 cm soil layer. Surface mulching had the smallest root length density but the largest root length density proportion. Then non-mulching had the lowest root length density proportion. In the 28–56 cm soil layer, deep mulching had both the highest root weight density and root weight density proportion. For saline-alkaline soil, in the 0–28 cm soil layer, both surface and deep mulching treatments had higher root length density and root length density proportion than non-mulching. Then surface mulching had the highest root weight density. The lowest root weight density and root weight density proportion occurred under deep mulching. On the contrary, deep mulching had the highest root weight density proportion and the lowest root weight density in the 28–70 cm soil layer. These findings suggested that surface mulching promoted root development in the plough layers of both saline-alkaline and non-saline soils. Deep mulching inhibited root system development in the upper soil layers but enhanced root system development in soil layers below the 30 cm soil depth. Also straw mulching caused the root system to be thinner and longer under unfavorable salt and alkali conditions. Therefore the combination of straw mulching and drip irrigation was highly promising for efficient cotton production in arid areas.

Key words Straw mulching, Drip irrigation, Cotton, Water and salt movement, Root distribution

(Received Jun. 24, 2013; accepted Sep. 29, 2013)

根系不仅是吸收水分、养分的器官, 还是合成氨基酸和激素、分泌有机酸等多种生理活性物质的场所^[1]。作物根系的生长、分布与土壤水分状况密切相关, 并对作物生长及产量产生很大影响^[2]。生长在不同条件下的植物, 根系的形态特征和分布格局都会产生与环境相适应的改变^[3]。棉花是直根系深根作物, 土壤水分状况和土壤温度是影响作物根系生长的重要因素^[4], 滴灌能够使作物主要根系活动区的土壤始终保持在最优含水状态^[5]。方怡向等^[6–12]先后从不同角度研究了膜下滴灌条件下水分、灌溉量对棉花根系生长、分布特征的影响。龚江等^[13–14]研究了膜下滴灌棉花根系发育特征及其与土壤水盐分布的关系。毕远杰等^[15]认为秸秆覆盖和地膜覆盖均能有效减少棵间蒸发, 起到蓄水保墒的作用, 且能有效降低油葵主根层土壤的积盐程度。赵耕毛等^[16]认为秸秆覆盖能明显抑制土面蒸发, 具有很好的保墒效果; 秸秆覆盖能明显减弱土壤盐分的表聚作用, 有效缓解盐分对作物直接接触危害。余世鹏等^[17]认为秸秆还田覆盖处理能减少土壤水分蒸发, 提高土壤保水能力和作物水分利用能力, 对夏玉米产量及品质提高最明显, 但是覆盖处理根层和根下层土壤水分含量较大, 根层土壤水分消耗速度最慢, 盐分淋洗能力低, 土壤积盐较剧烈, 土壤次生盐渍害风险较大。

综上, 秸秆覆盖具有改变农田下垫面性质和能量平衡, 减少土壤蒸发、蓄水保墒、调节地温、提

高肥力、提高作物产量等综合作用。国内外专家学者在秸秆覆盖方面作了大量研究工作, 尤其在内地形成了丰富的研究成果, 并在实践中推广应用, 但秸秆覆盖在干旱区的研究相对薄弱, 尤其在滴灌技术广泛应用的土壤盐渍化区域, 秸秆覆盖滴灌水盐调控方面的类似研究几乎空白。由于新疆大部分地区土壤残膜污染问题越来越严重, 只有从源头上遏制残膜污染, 才能促进新疆棉花种植业可持续发展, 而新疆秸秆资源丰富, 本文在前人研究基础上, 结合新疆特点, 将秸秆覆盖与滴灌相结合, 发挥各自优势, 保墒抑盐, 解决残膜污染等一系列问题。为探索秸秆覆盖代替塑料薄膜与滴灌结合的可行性, 需了解秸秆覆盖对滴灌棉田土壤水盐分布及棉花根系的影响特点, 同时探索耕作层以下 30 cm 处埋设一层秸秆进行深层秸秆覆盖与滴灌结合的效果, 为棉花根系生长提供良好的生境条件, 引导当地棉花种植业去除对塑料薄膜的依赖, 为秸秆覆盖滴灌技术在新疆推广应用提供依据, 同时也为干旱区盐渍土改良提供新的思路。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于 2012 年 4—10 月进行, 试验地点位于天山北麓准噶尔盆地南缘, 新疆石河子市西郊石河子大学农试场二连现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地(E85°59', N44°19', 海拔 412 m), 平均地面坡度

6%, 年平均日照时数 2 865 h, $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 3 463.5 $^{\circ}\text{C}$, $>15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 2 960.0 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 170 d。年平均气温 $(7.7\pm 0.90)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 一年中的最高气温出现在 7 月, 平均气温 $(25.4\pm 0.74)\text{ }^{\circ}\text{C}$; 最低气温出现在 1 月, 平均气温 $(-5.5\pm 2.07)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年降水量 $(213\pm 56.7)\text{ mm}$, 年蒸发量 $(1\ 342\pm 413)\text{ mm}$ ^[18]。试验期间地下水位(5—9 月) 低于 8 m。

1.2 试验方法

采用测坑试验, 测坑规格为 3 m \times 2 m \times 2.3 m(长 \times 宽 \times 深), 共 6 个测坑。测坑土壤类型有 2 种, 非盐碱土与盐碱土, 非盐碱土为中壤土, 平均容重 $1.455\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 田间持水量 31%(质量含水量, 下同), 初始含盐量 0.5% 左右; 盐碱土属于粉质黏土, 平均容重 $1.54\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 田间持水量 27%, 初始含盐量在 2.0% 左右, 根据新疆盐碱土分类标准, 属于氯化物硫酸盐中度盐化土壤。

考虑到秸秆覆盖能够减缓覆盖层以下土壤水分上移, 如果在耕作层以下平铺一层秸秆, 相当于对耕作层以下土层进行了一层秸秆覆盖, 该处秸秆层可能会起到减少或阻断耕作层以下土层水分向上迁移, 进而减少可溶性盐分随水向上迁移的可能, 而灌水时盐分可透过秸秆层向下迁移, 从而达到降低耕作层含盐量满足作物生长的目的, 为此提出了耕作层以下进行深层秸秆覆盖的试验想法。本文试验

设 6 个处理, 分别为非盐碱土表层覆盖(LSM)、非盐碱土 30 cm 深层覆盖(LM30)、非盐碱土无覆盖(LUM)、盐碱土表层覆盖(SSM)、盐碱土 30 cm 深层覆盖(SM30)和盐碱土无覆盖(SUM), 每个处理设 2 次重复。

非盐碱土和盐碱土灌水次数、灌溉定额与施肥均保持一致, 全生育期灌水次数共 11 次, 灌溉定额 378 mm, 灌水定额在 35 mm 左右, 灌溉水源为当地深层地下水, 矿化度 $1.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 施肥量 $832\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (尿素和磷酸二氢钾按照 2:1 的比例进行滴灌随水追施)。

供试棉花品种为“新陆早”系列的“惠远 710”, 南北向种植。采用当地上年度保存完好的干燥小麦秸秆为覆盖材料, 秸秆在上年度脱粒碾压过后呈扁平状, 不切割, 在棉花播种前均匀覆盖, 秸秆覆盖量为 $16\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 表层覆盖厚度约 3 cm。30 cm 深处覆盖处理时, 先将测坑内 0~30 cm 土壤移除, 待秸秆平整铺设后再分层回填原土, 保持各层容重不变, 回填后深层覆盖秸秆层厚度约 1.5 cm。2012 年 5 月 1 日采用“干播湿出”方式播种。每个测坑铺设 2 条滴灌带, 每条滴灌带控制 2 行棉花, 行距为 30 cm+60 cm+30 cm, 株距为 10 cm, 种植模式示意图见图 1, 滴头间距 30 cm, 设计滴头流量 $1.6\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

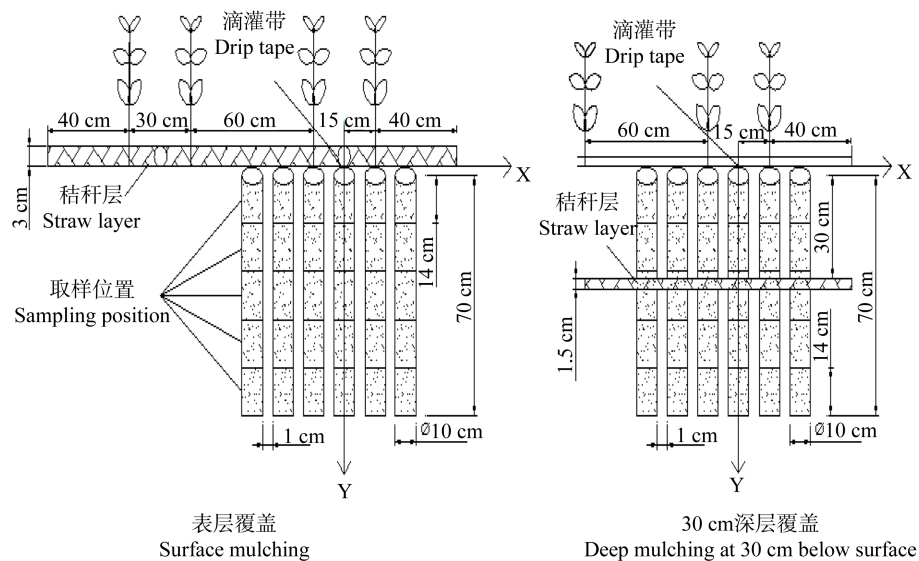


图 1 试验设置和根系取样位置示意图

Fig. 1 Test setup and root sampling location diagram

1.3 样品采集与项目测定

在水平方向距滴灌带 0、25 cm、45 cm 处分别向下 0、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 处取土样, 采用烘干法测其含水量, 对烘干土样研磨过 1 mm 土壤筛后, 按照 1:5 土水质量比用 DDS-307 电导率仪测其电导率 EC 值并转换为土壤

含盐量(%)。

在棉花絮期的 8 月 27 日采用根钻取棉花根系, 根钻直径 10 cm。水平方向在滴灌带两侧棉花根系分布约 70 cm 范围内设 6 个取样点, 取样深度 0~70 cm, 每 14 cm 为一取样单元, 取样点位置见图 1 所示。为便于分析, 以剖面上滴灌带所在位置为原点, 以

水平向右为 X 轴正向, 以垂直向下为 Y 轴正向。将取出的土样浸泡 24 h 后过 0.5 mm 筛, 捡出所有根系并拍照, 用计算机图像分析技术量化总根长, 之后放入烘箱, 在 65 °C 下烘 72 h, 采用万分之一电子天平称其质量。

各项目计算公式:

根长密度=土体内根系总长度/土体体积 (1)

根重密度=单元土柱土体内根系干物质质量/土体体积 (2)

根长密度比重(简称根长比重)=单元土柱土体内根系长度/剖面全部土柱根系总长度×100% (3)

根重密度比重(简称根重比重)=单元土柱土体内根系干物质质量/剖面全部土柱根系干物质总质量×100% (4)

根系平均单位质量长度=总根长密度/总根重密度 (5)

1.4 数据分析

将各深度土层水平方向 6 个取样点的根系数据作为样本容量, 垂直方向 5 个深度点的根系数据作为水平方向不同位置的样本容量。所获数据用 Oriange 8.5 作图, SPSS 16.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对滴灌棉花水盐分布的影响

秸秆覆盖位置不同对土壤水分分布的影响不同, 同时也影响土壤中可溶性盐分的运动与分布^[19-20]。在灌溉作用下表层土壤脱盐, 盐分随水分运动和迁移到更深层土壤, 灌溉结束后, 在蒸发和蒸腾作用下盐分又随水分上移^[21]。本文以棉花絮期的 2012 年 8 月 25 日数据为例说明秸秆覆盖对土壤水盐分布的累积效应(图 2、图 3), 此时距上次灌水 8 d, 上次灌水定额 33.33 mm, 即将进行下次灌溉。

图 2 显示, 非盐碱土 3 个处理垂直方向的变化趋势有所不同。0~20 cm 深度范围内表层覆盖土壤含水率最大, 30 cm 深层覆盖次之, 无覆盖最低; 20~50 cm 深度范围则无覆盖处理含水率最低, 表层覆盖近滴灌带处含水率低于 30 cm 深层覆盖, 远离滴灌带处则高于 30 cm 深层覆盖; 50~80 cm 范围仍是表层覆盖土壤含水率最高, 30 cm 深层覆盖次之, 并高于无覆盖处理; 但在 80~100 cm 范围则表现为无覆盖处理含水率最高, 表层覆盖次之, 30 cm 深层覆盖最

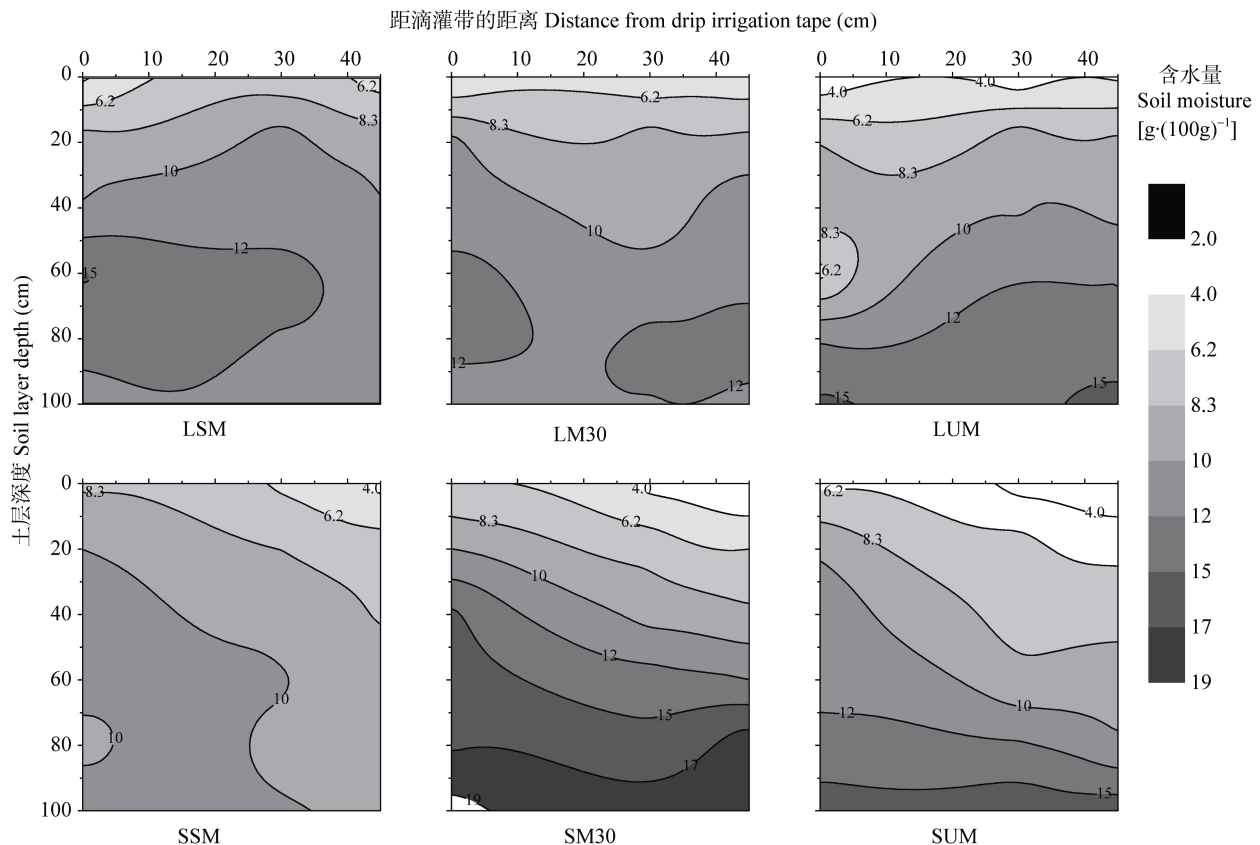


图 2 不同秸秆覆盖处理下滴灌棉花絮期(8月25日)土壤水分剖面分布

Fig. 2 Soil water distribution in drip irrigated cotton field at batt stage (August 25) under different straw mulching treatments

LSM: 非盐碱土表层覆盖; LM30: 非盐碱土 30 cm 深层覆盖; LUM: 非盐碱土无覆盖; SSM: 盐碱土表层覆盖; SM30: 盐碱土 30 cm 深层覆盖; SUM: 盐碱土无覆盖。下同。LSM: surface mulching in non-saline soil; LM30: deep mulching at 30 cm below surface in non-saline soil; LUM: no-mulching in non-saline soil; SSM: surface mulching in saline-alkali soil; SM30: deep mulching at 30 cm below surface in saline-alkali soil; SUM: no-mulching in saline-alkali soil. The same below.

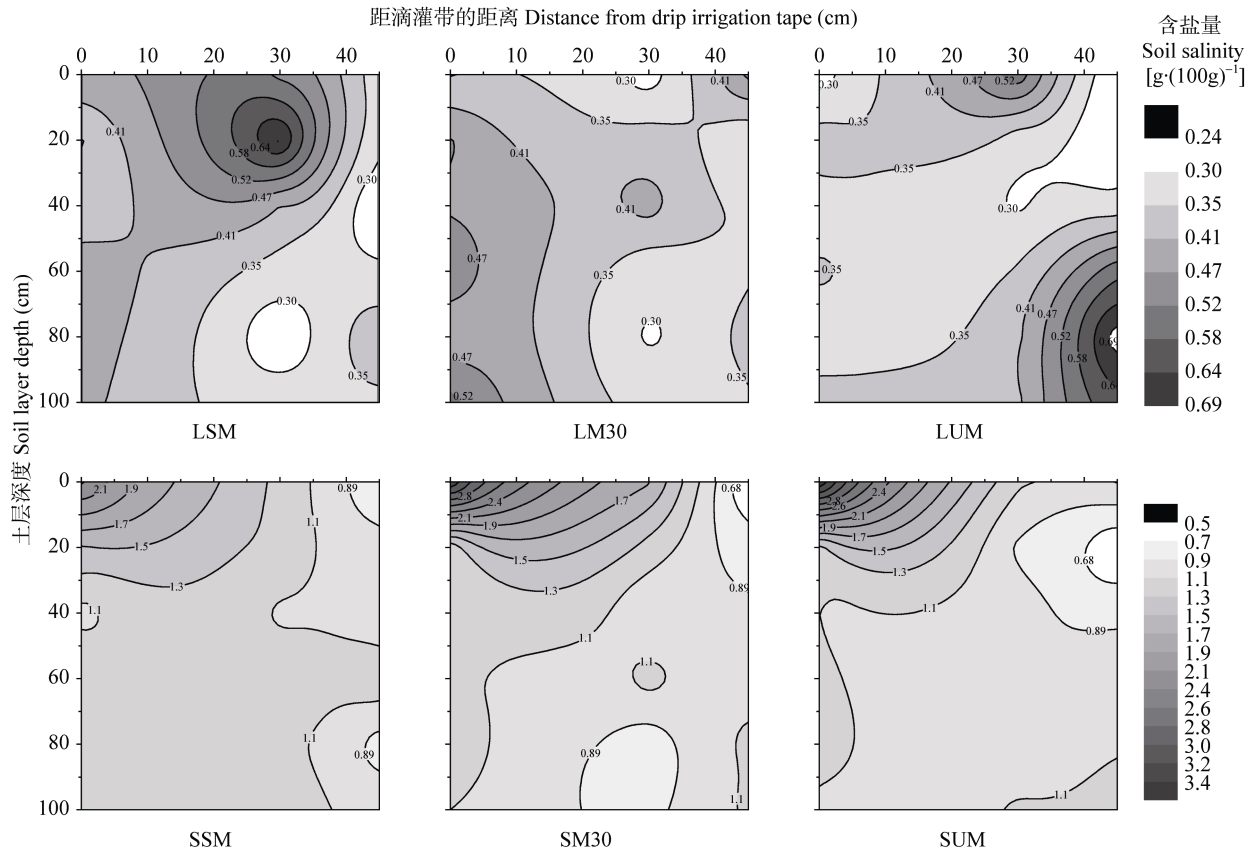


图 3 不同秸秆覆盖处理下滴灌棉花絮期(8月25日)土壤盐分分布

Fig. 3 Soil salt distribution in drip irrigated cotton field at batt stage (August 25) under different straw mulching treatments

低。水平方向则总体表现为距离滴灌带越远土壤含水率越低;在一定深度范围内,滴灌带下方表现为30 cm 深层覆盖略高于表层覆盖;远离滴灌带处则表现为表层覆盖高于30 cm 深层覆盖,但无覆盖均为最低。说明表层覆盖对于剖面土壤整体保水性均较好,30 cm 深层覆盖整体保水性优于无覆盖,相对表层覆盖而言仅在秸秆层以下靠近滴灌带的有限范围内具有优势。

图 2 显示,盐碱土 3 个处理土壤含水率总体变化趋势与非盐碱土类似。0~20 cm 深度范围内仍是表层覆盖土壤含水率最大,30 cm 深层覆盖次之,无覆盖最低;但 20~60 cm 范围则表现为 30 cm 深层覆盖含水率最高,表层覆盖次之;60~100 cm 范围仍是 30 cm 深层覆盖土壤含水率最高,无覆盖高于表层覆盖。说明盐碱土条件下表层覆盖主要对于耕作层土壤保水性较好,更易抑制表层水分蒸发散失,30 cm 深层覆盖对于深层保水性优势明显,减少了秸秆层以下土壤水分向上迁移,显著提高耕层以下剖面水分含量。

图 3 显示,非盐碱土的盐分含量为 0.2%~0.7%,盐碱土的盐分含量为 0.5%~4.0%。非盐碱土不同处理,在滴灌带下方表层覆盖和无覆盖土壤盐分变化均较小,30 cm 深层覆盖剖面盐分变化相对较大;在距滴灌带 25 cm 处,表层覆盖土壤盐分变化最大,而 30 cm 深层覆盖和无覆盖变化接近。表层覆盖盐

分向水平距滴灌带 30 cm、深度 20 cm 处聚集,30 cm 深层覆盖则在滴灌带正下方 40~70 cm 范围聚集,无覆盖盐分向水平距滴灌带 45 cm、深度 80 cm 处聚集。表层覆盖在深度 10~40 cm 盐分含量明显大于 30 cm 深层覆盖和无覆盖。以上结果说明秸秆覆盖对盐分分布影响显著,表层覆盖将盐分聚集区调控至 20 cm 以下距离滴灌带远处,30 cm 深层覆盖将盐分调控至滴灌带下方垂直方向 40 cm 以下土层,水平方向远端表层盐分聚集较弱。

盐碱土 3 种覆盖方式的共同点表现在盐分均在深度 25 cm 以内、水平 35 cm 左右范围内以滴灌带为核心聚集。无覆盖和 30 cm 深层覆盖在 20 cm 以下深度的盐分含量接近,均为 1.05%左右,而表层覆盖 25 cm 以下盐分含量平均在 1.1%左右,说明表层秸秆覆盖在非盐碱土和盐碱土中均具抑制盐分上移的作用。30 cm 深层覆盖在棉花絮期的盐分分布与无覆盖比较接近,说明此时 30 cm 深层秸秆覆盖已作用微弱,主要由于秸秆腐烂及灌水作用使秸秆空隙逐渐被土壤颗粒充填并使土壤毛管作用恢复。

2.2 秸秆覆盖对滴灌棉花根系根长密度的影响

根长密度表示单位土体内根系总长度,反映根系毛细根数量,也间接反映了根系吸收水分、养分的范围和强度。2012 年 8 月 25 日各处理根长密度分布见表 1~2 和图 4。

表 1 不同秸秆覆盖处理下土壤垂直方向棉花根长密度分布

Table 1 Vertical distribution of cotton root length density under different straw mulching treatments $\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$

土层深度 Soil depth (cm)	非盐碱土 Non-saline soil			盐碱土 Saline-alkali soil		
	LSM	LM30	LUM	SSM	SM30	SUM
0~14	497.18aA	1 011.5a, A	1 104.88aA	1 411.23abA	1 666.97aA	971.35aA
14~28	1 250.55bA	1 475.67aA	1 479.84aA	1 440.34abA	2 305.76aA	1 799.95aA
28~42	1 394.62bA	1 731.75aA	1 382.05aA	1 730.36aA	2 229.37aA	1 981.10bA
42~56	1 048.16bA	1 153.72aA	1 283.67aA	1 325.57abA	1 619.49abA	1 881.60aA
56~70	1 256.64bA	862.22aA	1 064.85aA	826.69bA	596.94bA	1 108.06aA

不同大写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示不同深度间差异显著($P<0.05$), 下同。Different capital letters indicate significant differences among different treatments at 0.05 level, different lowercase letters indicate significant differences among different depths at 0.05 level. The same below.

表 2 不同秸秆覆盖处理下土壤水平方向棉花根长密度分布

Table 2 Horizontal distribution of cotton root length density under different straw mulching treatments $\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$

距滴灌带距离 Distance from drip irrigation tape (cm)	非盐碱土 Non-saline soil			盐碱土 Saline-alkali soil		
	LSM	LM30	LUM	SSM	SM30	SUM
-25~-15	896.14aA	967.50abA	1 010.97aA	1 277.27 ab, A	826.44acA	1 145.99aA
-15~-5	1 101.50aA	1458.02aA	1 276.10aA	2 094.22aA	1 084.63abcB	1 970.12aA
-5~5	737.03aA	632.41bA	942.81aA	1 165.21bA	1 590.95bA	1 500.34aA
5~15	1 013.58aA	1 081.97abA	1 149.44aA	835.68bA	1 492.11abcA	1 772.47aA
15~25	749.99aA	1 284.44abB	803.96aA	1 389.61abA	923.74abcA	981.86aA
25~35	948.91aA	810.50abA	1 132.00aA	980.08bA	816.31cA	1 047.75aA

距滴灌带的距离表示图 1 中水平方向与滴灌带相对位置, 下同。The distance from the drip irrigation tape is the relative position of horizontal direction from the drip irrigation tape in Figure 1. The same below.

图 4 显示, 盐碱土棉花根长密度大小及分布范围均高于非盐碱土, 特别是在 50 cm 以下土层时 30 cm 深层覆盖尤为典型。非盐碱土表层覆盖深度 0~20 cm 范围根长密度最少, 未出现明显根系聚集。30 cm 深层覆盖在滴灌带正下方根长密度最少, 且根系在纵向 20~50 cm、水平-20~5 cm、5~30 cm 两处聚集。在无覆盖的滴灌带正下方 25~45 cm 区域根长密度较少, 在纵向 20~35 cm、水平-20~5 cm 处根系聚集。结合表 1 数据, 0~14 cm 表层土体里面无覆盖处理根系密度最大, 平均根长密度 $1 104.88 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$, 同时该部分土体根长密度所占该处理总根长密度比重也最大(17.50%); 最小的为表层覆盖, 平均根长密度 $497.18 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅为无覆盖处理的 45%, 同时根长密度的比重也最小(9.13%); 30 cm 深层覆盖与无覆盖接近。0~28 cm 土层与 0~14 cm 分布特点相同, 28~70 cm 则是 30 cm 深层覆盖平均根长密度最大($1 249.23 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$), 表层覆盖处理最小($1 233.15 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$), 三者差别不大, 但从自身根长密度比重上却是表层覆盖最大(67.91%), 其次是 30 cm 覆盖(60.11%), 无覆盖处理为 59.07%。说明秸秆覆盖对深层根系分布影响更大, 秸秆覆盖由于提高了深层土壤水分含量, 进而促进根系向深处发育。

图 4 显示, 0~70 cm 深度内的盐碱土根系明显多于非盐碱土根系, 3 个处理均在滴灌带两侧根系聚集, 其中表层覆盖在 0~30 cm 土层内平均根长密度

$1 425 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$, 30 cm 覆盖 $1 986 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ 。30~70 cm 土层内表层覆盖平均根长密度最少($1 294 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$), 无覆盖最多($1 556 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$)。结合表 1 数据, 0~14 cm 土层无论是平均根长密度还是根长比重均表现为无覆盖处理最小, 30 cm 深层覆盖根长密度最大, 表层覆盖根长比重最大; 平均根长密度表现为无覆盖 $971.36 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ 、表层覆盖 $1 411.23 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ 、30 cm 深层覆盖 $1 666.98 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$, 表层覆盖和 30 cm 深层覆盖分别较无覆盖高 45.3%和 71.6%; 根长比重表现为无覆盖 12.54%, 表层覆盖 20.96%, 30 cm 覆盖 19.80%。0~28 cm 土层, 表层覆盖与 30 cm 深层覆盖根长密度与根长比重也均高于无覆盖处理, 其中根长密度分别高于无覆盖 2.9%和 43.3%。28~42 cm 土层 30 cm 深层覆盖根长密度及根长比重均最高, 分别为 $2 229.37 \text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 26.48%, 分别较无覆盖和表层覆盖高 12.5%和 28.8%。说明秸秆覆盖显著影响根系分布, 根系更易在土壤水分含量高、盐碱含量低的中上层发育; 但 30 cm 深层覆盖影响了 30 cm 以下土层盐分的分布, 特别是在前期, 因此在秸秆层下方根系分布相对较高。但总的来看, 28~70 cm 土层内平均根系密度表现为 30 cm 深层覆盖最低。前人研究^[13]表明, 盐胁迫下, 棉花根系分布发生适应性变化, 产生补偿效应, 通过显著增加脱盐区(0~30 cm 土层)根系数量, 来获得更多水分和养分保证棉花生长需要, 这与本研究结果相似。

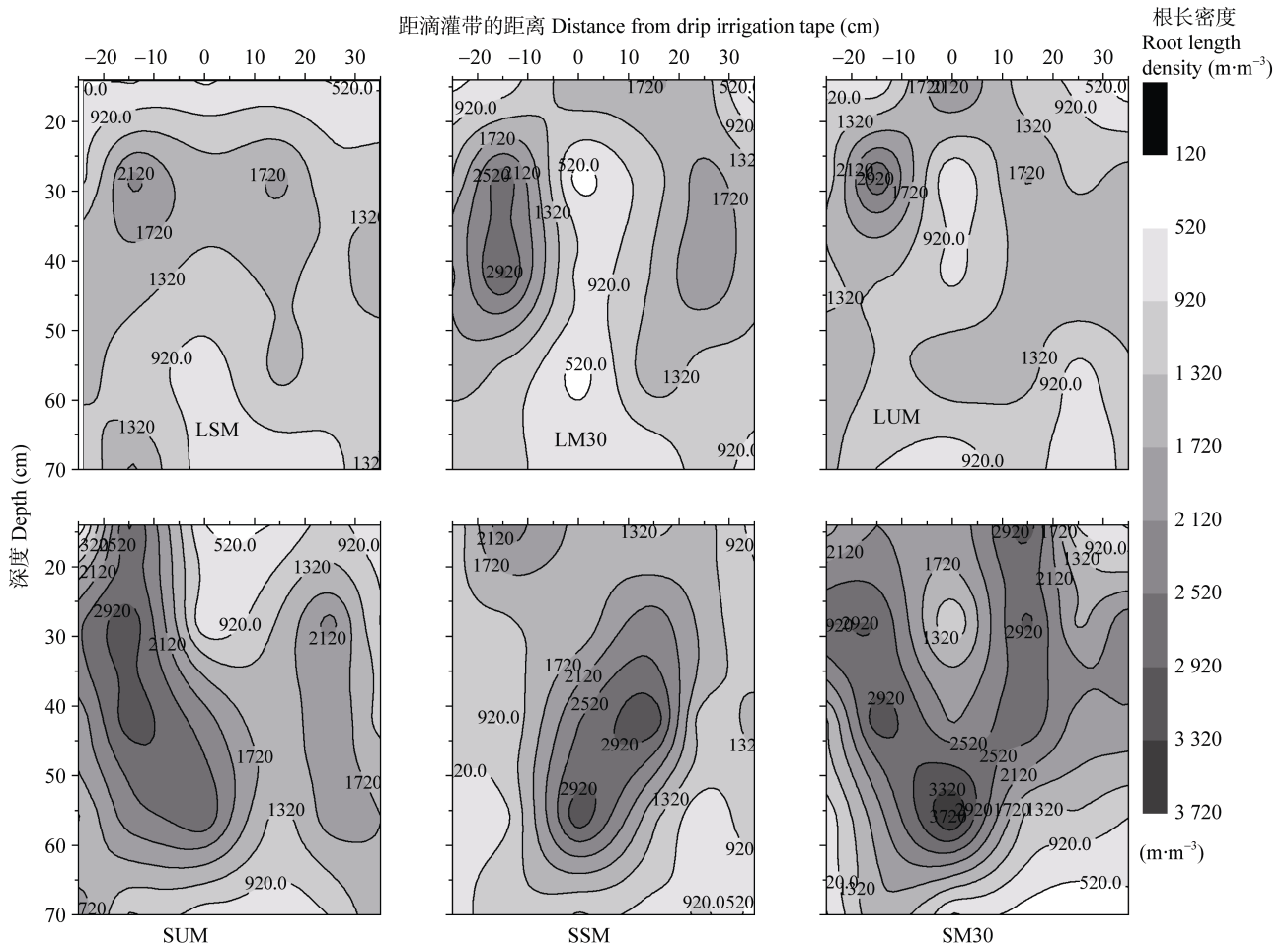


图 4 不同秸秆覆盖处理下滴灌棉花絮期(8月25日)根长密度分布

Fig. 4 Root length density distribution of drip irrigated cotton field at batt stage (August 25) under different straw mulching treatments

表 2 表明, 非盐碱土表层覆盖对于棉花根长密度在水平方向上各位置都不具有优势, 在水平距滴灌带-15 cm 处比无覆盖少 $1\ 047\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$, 滴灌带下方比无覆盖少 $1\ 234\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$, 距滴灌带-25 cm 处为 $689.01\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在距滴灌带-15 cm 和 35 cm 处, 30 cm 深层覆盖比无覆盖总根长密度多 $1\ 091\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2\ 882\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$, 其余各处 30 cm 深层覆盖根长密度也不占优势。表层覆盖对盐碱土棉花深度 0~70 cm 土层的根长密度影响仍不占优势, 反而无覆盖和 30 cm 深层覆盖相对活跃, 且其变化趋势、数值均大致相同。在距滴灌带 0 和 15 cm 处表层覆盖总根长密度比无覆盖多 $2\ 554.45\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3\ 938.56\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$, 其余各处均低于无覆盖。30 cm 深层覆盖只在距滴灌带 0、15 cm 和 35 cm 处总根长密度比无覆盖多 $2\ 010\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5\ 620\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $406\ \text{m}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

从表 2 非盐碱土根长密度上来看, 在水平 15~25 cm 处表层覆盖与 30 cm 深层覆盖和无覆盖之间存在显著差异。从深度上来看(见表 1), 表层覆盖 0~14 cm 土层内与其他土层差异显著 ($P<0.05$); 30 cm 深层覆盖 28~42 cm 与 56~70 cm 土层之间差异显著 ($P<0.05$); 在水平方向上, 30 cm 深层覆盖-15~-5 cm

与-5~5 cm 之间差异显著 ($P<0.05$)。盐碱土条件下, 30 cm 深层覆盖与表层覆盖在水平方向上-15~-5 cm 土层内差异显著 ($P<0.05$); 从深度上看, 表层覆盖的 28~42 cm 和 56~70 cm 土层之间根长密度差异显著; 30 cm 深层覆盖在 56~70 cm 与其他土层间差异显著, 无覆盖在 0~14 cm 与 28~42 cm 土层间差异显著; 从水平上来看每种覆盖处理均在不同土层有多处显著差异。盐碱土上, 覆盖方式间、垂直和水平方向上多处都有显著差异。

2.3 秸秆覆盖对滴灌棉花根重密度的影响

根重密度表示单位土体里面根系干物质总质量, 反映根系质量, 也间接反映根系吸收水分、养分的范围和强度大小, 各处理生育期末(8月25日)根重密度分布见图 5 和表 3~4。

图 5 显示, 无论非盐碱土还是盐碱土根重密度均表现棉花主根系下方分布最多, 在滴灌带两侧类似对称分布, 非盐碱土垂直方向分布相对更深, 可达 50~60 cm, 盐碱土相对较浅, 主要集中在 0~30 cm。非盐碱土根系密度分布在滴灌带下方高于盐碱土, 盐碱土根重密度分布与滴灌湿润锋分布特点类似, 显然受土壤水分和盐分影响, 呈现在耕作层内聚集。

说明盐碱土条件下滴灌水分分布对棉花根系影响显著, 土壤盐分显著抑制棉花根系发育。非盐碱土条件下 30 cm 深层覆盖根系明显向深层发育和分布, 受深层水分含量较高的影响, 体现了根系向水性。盐碱土根系重量分布呈“无底托酒杯”状分布, 非盐碱土根系呈“木锥”状分布。与文献^[10]各生育阶段膜下滴灌棉花根重垂直分布呈现出明显的“T”型分布不同。

图 5 及表 3~4 结果表明, 非盐碱土情况下, 0~14 cm 土层表层覆盖处理根重比重最大, 为 73.42%; 30 cm 深层覆盖根重比重最小, 为 26.05%; 无覆盖为 51.50%。但根重密度却是无覆盖最大, 为 $11.94 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 远大于 30 cm 深层覆盖 ($4.36 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 30 cm 深层覆盖根重密度在 0~14 cm 土层仅为无覆盖的 36.5%, 而根长密度接近, 说明非盐碱土 30 cm 深层

覆盖浅层根系较细, 在一定程度上影响了根系发育。在 0~28 cm 土层, 表层覆盖根重比重最大, 为 78.08%, 30 cm 深层覆盖与无覆盖接近, 分别为 66.67%和 69.82%, 根重密度同样表现为无覆盖最大, 30 cm 覆盖最小, 说明 30 m 覆盖处理上层根系受到影响, 表层覆盖促进上层或者说耕作层根系发育, 30 cm 覆盖则限制了上层根系发育。在 28~42 cm 土层情况相反, 30 cm 深层覆盖根重密度最大, 为 $4.10 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 根重比重也最大, 为 24.48%; 无覆盖的根重比重为 8.8%, 根重密度为 $2.04 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 此时表层覆盖的根重比重为 11.14%, 根重密度为 $1.48 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。28~56 cm 土层也反映 30 cm 深层覆盖根重密度和根重比重均最大, 说明 30 cm 深层覆盖明显促进下层根系发育。

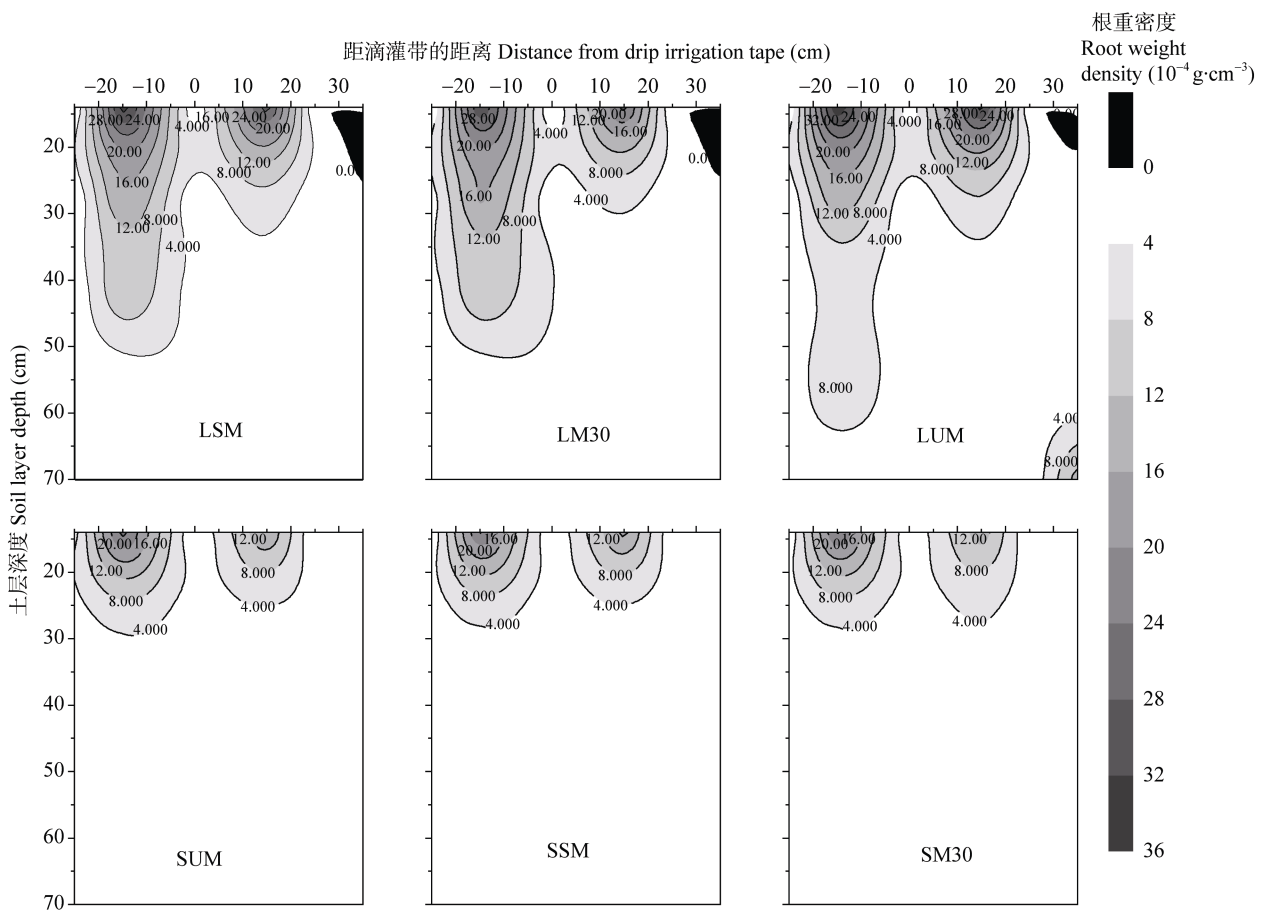


图 5 不同秸秆覆盖处理下滴灌棉花絮期(8月25日)根重密度分布

Fig. 5 Root weight density distribution in drip irrigated cotton field at batt stage (August 25) under different straw mulching treatments

表 3 不同秸秆覆盖处理下土壤垂直方向棉花根重密度方差分析

Table 3 Vertical distribution of cotton root weight density under different straw mulching treatments $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

土层深度 Soil depth(cm)	非盐碱土 Non-saline soil			盐碱土 Saline-alkali soil		
	LSM	LM30	LUM	SSM	SM30	SUM
0~14	9.70aA	4.36aA	11.94aA	6.61aA	3.02aA	4.97aA
14~28	0.61aA	6.80aA	4.24aA	6.62aA	2.01aA	2.91aA
28~42	0.10aA	1.13aA	2.04aA	3.58aA	1.14aA	1.16aA
42~56	0.71aA	0.85aA	2.24aA	0.54aA	0.44aA	0.78aA
56~70	0.71aA	0.63aA	2.71aB	0.29aA	0.16aA	0.51aB

表 4 不同秸秆覆盖处理下土壤水平方向棉花根重密度方差分析

Table 4 Horizontal distribution of cotton root weight density under different straw mulching treatments $10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

距滴灌带距离 Distance from drip irrigation tape (cm)	非盐碱土 Non-saline soil			盐碱土 Saline-alkali soil		
	LSM	LM30	LSM	LM30	LSM	LM30
-25~-15	0.39aA	0.83aA	0.58acA	1.01abA	0.52aB	0.63aC
-15~-5	0.34aA	10.41bA	10.95bA	5.63bA	12.36bB	1.10aC
-5~5	1.07aA	1.31aA	0.66acA	0.79abA	0.38abB	0.50aC
5~15	10.56aA	3.43aA	7.76abcA	1.75abA	3.51abB	3.29aC
15~25	0.50aA	0.41aA	0.48acA	0.75abA	0.57aB	0.64aC
25~35	0.35aA	0.33aA	2.72abcA	0.39aA	0.31aB	0.60aC

盐碱土情况下, 0~28 cm 土层表现为 30 cm 深层覆盖根重比重最小, 为 74.20%; 表层覆盖与 30 cm 深层覆盖接近, 为 74.95%; 均小于无覆盖处理的 76.19%。盐碱土条件下 3 种处理均高于非盐碱土的根重比重, 说明受盐碱影响棉花根系 75% 的根系重量分布在 0~28 cm 的耕作层。非盐碱土根系分布更深, 在 0~28 cm 土层根重密度, 表层覆盖处理最高, 为 $6.62 \times 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 30 cm 深层覆盖最低, 为 $2.52 \times 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 无覆盖处理为 $3.94 \times 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 说明 30 cm 深层覆盖影响上层根系发育, 表层覆盖有利于上层根系发育; 28~70 cm 土层情况相反, 30 cm 深层覆盖根重比重最大, 但根重密度最小, 为 $0.58 \times 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。总平均根重密度表现为 30 cm 深层覆盖最小。

2.4 秸秆覆盖对根系平均单位质量长度的影响

表 5 表明, 盐碱土 0~70 cm 深度范围棉花根系平均单位质量长度均高于非盐碱土, 相应的单位长度质量均低于非盐碱土。盐碱土棉花根系偏细长, 单位体积土体里面细根较多。非盐碱土 3 种秸秆覆盖处理中, 表层覆盖的单位质量根系长度最大 ($4.11 \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$), 无覆盖最小 ($2.72 \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$), 表层覆盖是无覆盖的 1.51 倍。盐碱土 30 cm 深层覆盖根系单位质量长度最大 ($12.41 \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$), 无覆盖最小 ($6.38 \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$), 30 cm 深层覆盖是无覆盖的 1.95 倍。说明秸秆覆盖更能促进根系发育延伸, 在盐碱逆境下秸秆覆盖促进根系向更细更长方面发育。

表 5 不同秸秆覆盖处理下棉花根系的单位质量长度

Table 5 Cotton root length of unit mass under different

straw mulching treatments $\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$

处理 Treatment	LSM	LM30	LUM	SUM	SSM	SM30
单位质量长度 Length per unit mass	4.11	3.72	2.72	6.38	6.43	12.41

3 结论

本研究结果表明, 表层秸秆覆盖对于土壤整体保水性较好, 能有效抑制耕作层水分散失和盐分聚集, 30 cm 深层秸秆覆盖整体保水性优于无覆盖, 相对表层覆盖仅在秸秆层以下靠近滴灌带的有限范围内具有优势, 并显著提高耕层以下土壤水分含量,

但在棉花絮期对于盐分抑制作用不明显。

秸秆覆盖通过影响土壤水盐运动而显著影响滴灌棉花根系分布, 尤其对深层根系分布影响更大。非盐碱土中, 0~28 cm 土层无覆盖的棉花根长密度、根重密度、根长密度比重均最大, 表层覆盖根长密度最小但根重比重最大, 30 cm 深层覆盖根重密度最小; 28~70 cm 土层, 30 cm 深层覆盖根长密度最大, 表层覆盖根长密度最小, 但根长密度比重最大, 无覆盖根长密度比重最小, 其中在 28~56 cm 土层 30 cm 覆盖根重密度和根重比重均最大。说明表层覆盖促进非盐碱土耕作层根系发育, 30 cm 深层覆盖则可促进下层根系发育。

盐碱土 0~28 cm 土层, 表层覆盖和 30 cm 深层覆盖的根长密度与根长比重均高于无覆盖处理, 同时表层覆盖根重密度最高, 30 cm 深层覆盖根重密度和根重比重均最低; 28~70 cm 土层情况相反, 30 cm 深层覆盖根重比重最大, 但根重密度最小, 其中 28~42 cm 土层 30 cm 深层覆盖根长密度及根长比重均最高。说明表层覆盖有利于盐碱土上层根系发育, 30 cm 深层覆盖对盐碱土深层根系发育影响较大。在盐碱逆境下秸秆覆盖促进根系向更细更长方面发育。

本文秸秆覆盖的保水性及对水盐分布的影响基本特点与已有众多研究结果类似, 但秸秆覆盖与滴灌结合, 从而改变或影响了滴灌棉花根系的分布, 这一点已有研究成果相对较少。本文不仅分析了秸秆覆盖结合滴灌水盐分布的特点, 更在此基础上探讨了地表下 30 cm 深层秸秆覆盖对滴灌土壤水盐分布及棉花根系的影响, 也探讨了非盐碱土和盐碱土 2 种土壤条件下根系的分布对比。结果表明, 棉花根重密度分布无论非盐碱土还是盐碱土均表现在棉花主根系下方分布最多, 在滴灌带两侧近似对称分布, 非盐碱土根重密度垂直方向分布相对更深, 呈“木锥”状分布, 盐碱土根重密度分布相对较浅, 主要集中在 0~30 cm, 呈“无底托酒杯”状分布, 且在盐碱逆境下秸秆覆盖对根系向细长方面发育具有明显促进作用。这与前人研究结果均不太一致, 综合分析认为, 秸秆覆盖与滴灌结合对干旱区盐碱土壤的水盐和棉花根系的调控具有积极作用, 秸秆覆盖滴灌棉花在干旱区具有良好的应用前景, 值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] Yoshida S, Bhattacharjee D P, Cabuslay G S. Relationship between plant type and root growth in rice[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1982, 28(4): 473–481
- [2] 冯广龙, 刘昌明. 土壤水分对作物根系生长及分布的调控作用[J]. *生态农业研究*, 1996, 4(3): 5–9
Feng G L, Liu C M. Roles of soil water in regulating root growth and distribution[J]. *Ecological Agricultural Research*, 1996, 4(3): 5–9.
- [3] 孙祥, 于卓. 白刺根系的研究[J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 50–54
Sun X, Yu Z. A study on root system of *Nitraria tangutorum* [J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(4): 50–54
- [4] 张立桢, 曹卫星, 张思平, 等. 棉花根系生长和空间分布特征[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 266–273
Zhang L Z, Cao W X, Zhang S P, et al. Characterizing root growth and spatial distribution in cotton[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 266–273
- [5] 马富裕, 严以绥. 棉花膜下滴灌技术理论与实践[M]. 新疆: 新疆大学出版社, 2002: 1–2
Ma F Y, Yan Y S. The cotton of mulched drip theory and practice[M]. Xinjiang: University Publishing, 2002: 1–2
- [6] 方怡向, 赵成义, 串志强, 等. 膜下滴灌条件下水分对棉花根系分布特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 96–100
Fang Y X, Zhao C Y, Chuan Z Q, et al. Root distribution characteristics of cotton in different drip irrigation amounts irrigation under mulched[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 96–100
- [7] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 98–105
Liu M X, Yang J S, Li X M, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Supp1): 98–105
- [8] 闫映宇, 赵成义, 盛钰, 等. 膜下滴灌对棉花根系、地上部分生物量及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 970–976
Yan Y Y, Zhao C Y, Sheng Y, et al. Effects of drip irrigation under mulching on cotton root and shoot biomass and yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 970–976
- [9] 王允喜, 李明思, 蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 31–38
Wang Y X, Li M S, Lan M J. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 31–38
- [10] 胡晓棠, 陈虎, 王静, 等. 不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1682–1689
Hu X T, Chen H, Wang J, et al. Effects of soil water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1682–1689
- [11] 刘凤山, 周智彬, 陈秀龙, 等. 应用根系生态位指数研究不同灌溉量棉花根系分布特征[J]. *棉花学报*, 2011, 23(1): 39–43
Liu F S, Zhou Z B, Chen X L, et al. Using RENEI to study the distribution characteristics of cotton roots in different amounts of drip irrigation under film[J]. *Cotton Science*, 2011, 23(1): 39–43
- [12] 罗宏海, 朱建军, 赵瑞海, 等. 膜下滴灌条件下根区水分对棉花根系生长及产量的调节[J]. *棉花学报*, 2010, 23(1): 63–69
Luo H H, Zhu J J, Zhao R H, et al. Effect of water content in root zone on root growth and yield of cotton under drip irrigation with film mulching[J]. *Cotton Science*, 2010, 23(1): 63–69
- [13] 龚江, 鲍建喜, 吕宁, 等. 滴灌条件下不同盐水平对棉花根系分布的影响[J]. *棉花学报*, 2009, 21(2): 138–143
Gong J, Bao J X, Lü N, et al. Effects of different soil salinity levels on the distribution of cotton root in drip irrigation under film[J]. *Cotton Science*, 2009, 21(2): 138–143
- [14] 何雨江, 靳孟贵, 王在敏, 等. 膜下滴灌棉花根系发育特征及其与土壤水盐分布的关系[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 39–44
He Y J, Jin M G, Wang Z M, et al. Characteristics of cotton root development under mulch drip irrigation and their relationship with soil water and salt distribution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 39–44
- [15] 毕远杰, 王全九, 雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油菜产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊 1): 83–89
Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Effects of ground coverage measure and water quality on soil water salinity distribution and helianthus yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Supp1): 83–89
- [16] 赵耕毛, 刘兆普, 张博, 等. 滨海盐渍区海水养殖废水利用与减蒸抑盐措施研究[J]. *土壤*, 2010, 42(2): 292–296
Zhao G M, Liu Z P, Zhang B, et al. Studies on utilization of saline aquaculture water and measures to reduce evaporation and salt accumulation in subarid coastal zones[J]. *Soils*, 2010, 42(2): 292–296
- [17] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 优化灌溉与秸秆还田防控黄淮海平原农田土壤次生盐渍害研究[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3): 1–4
Yu S P, Yang J S, Liu G M. Study on prevention and control of secondary soil salinization under intensifying irrigation and straw returning in Huang-Huai-Hai Plain farmland[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 1–4
- [18] 杨传杰, 罗毅, 孙林, 等. 灌溉水矿化度对玛纳斯流域棉花生长影响的试验研究[J]. *资源科学*, 2012, 34(4): 660–667
Yang C J, Luo Y, Sun L, et al. Experimental study on the impacts of the irrigation water salinity on cotton growth in Manas River Oasis, Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2012, 34(4): 660–667
- [19] 张金珠, 虎胆·吐马尔白, 王振华. 秸秆覆盖对滴灌棉花土壤盐分分布的调控影响[J]. *节水灌溉*, 2012(7): 26–28
Zhang J Z, Hudan-Tumarebi, Wang Z H. Regulation impact of straw mulch on soil salinity distribution under drip irrigation for cotton[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(7): 26–28
- [20] 张金珠, 虎胆·吐马尔白, 王振华, 等. 不同深度秸秆覆盖对滴灌棉田土壤水盐运移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(3): 37–41
Zhang J Z, Hudan-Tumarebi, Wang Z H, et al. Effect of different depth straw mulching on soil water movement and salt transport under saline-alkali drip irrigation for the cotton[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(3): 37–41
- [21] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(8): 1091–1097
Fu Q P, Zhang J H, Wang Q J, et al. Change characteristics of soil salinity in Tarim Basin[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 1091–1097