

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.032

水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分布调控效果研究

陈文娟 李明思 秦文豹 徐亚南 聂锦杰 梁萌帆

(石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003)

摘要:为探究水平翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分布的调控效果,于2016—2017年和2019年分别在新疆维吾尔自治区石河子及库尔勒进行室内土槽试验和田间试验,对应用覆膜滴灌技术的土壤分别进行水平翻耕(T)与免耕(NT)处理,室内土槽试验主要研究翻耕措施对土壤水盐分布的调控机理,田间试验主要进行生产验证,以此分析水平翻耕措施对膜外土壤盐分的改良作用。试验结果表明:与免耕处理相比,水平翻耕可提高膜内耕层土壤的蓄水能力,降低土壤水平渗吸能力及垂直扩散能力,翻耕处理的膜内耕层土壤平均含水率比免耕处理高3.66个百分点,耕层以下土壤的平均含水率比免耕处理低4.13个百分点;水平翻耕处理下的膜内土壤盐分分布受水分淋洗作用影响较大,而膜外土壤盐分分布主要受翻耕的影响,其膜内下层土壤总积盐率是免耕处理的1.23倍,膜外土壤平均脱盐区范围比免耕处理深25 cm;首次翻耕对膜外土壤脱盐效果最明显,春耕可使膜内、外土壤盐分分布均匀度提高,翻耕处理的棉花总出苗率及总有效株占比率分别比免耕处理高23.62、25.19个百分点。覆膜滴灌条件下,滴灌淋洗和水平机械翻耕相结合相当于综合利用水利改良与客土改良治理土壤盐碱化,最终使覆膜滴灌技术产生的盐分空间分布由早期的“膜外表聚型”逐渐向后期的“膜内底聚型”转变。研究结果可为解决膜下滴灌条件下膜外土壤盐分表聚问题提供思路,同时也可作为滴灌条件下翻耕措施的合理选择提供参考。

关键词:土壤水盐分布;盐分表聚;膜下滴灌;水平翻耕;土壤改良

中图分类号: S341.1; S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0276-11

OSID:



Effect of Horizontal Tillage Measures Regulatory on Soil Water and Salt Distribution under Mulched Drip Irrigation

CHEN Wenjuan LI Mingsi QIN Wenbao XU Ya'nán NIE Jinjie LIANG Mengfan

(College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to explore the effect of horizontal tillage measures on the regulation of water and salt distribution in mulched drip irrigation, indoor soil trough tests and field trials were carried out in Shihezi and Korla of Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 2016—2017 and 2019, respectively. The experiment designed horizontal tillage (T) and no-tillage (NT) treatment of soil by using mulched drip irrigation technology, indoor soil trough test was mainly used to research the regulation mechanism of soil water and salt distribution by tillage measures, and field test was mainly used for production. Verification was made to analyze the improvement effect of horizontal tillage measures on the soil salt outside the membrane. The result showed that compared with no-tillage treatment, horizontal tillage can increase the water storage capacity of soil beneath the film, reduce the soil horizontal infiltration capacity and vertical diffusion capacity, the average water content of inner-membrane plowing layer with tillage treatment was 3.66 percentage points higher than that of the no-tillage treatment, but the average water content of the soil below the plowing layer was 4.13 percentage points lower than that of the no-tillage treatment. The distribution of soil salinity beneath the membrane under horizontal tillage treatment was greatly affected by water leaching, while the soil salt distribution outside the membrane was mainly affected by tillage, and the total salt accumulation rate in the deep layer beneath the membrane was 1.23 times of that of no-tillage treatment, the range of tillage treatment soil desalting area outside the membrane was 25 cm

收稿日期: 2019-09-03 修回日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790533)

作者简介: 陈文娟(1992—),女,博士生,主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究,E-mail: ChenWJ513@163.com

通信作者: 李明思(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉原理与新技术应用研究,E-mail: leemince-709@163.com

deeper than that of no-tillage treatment; the first tillage had the most obvious desalination effect on the outside membrane soil, and the spring tillage can make the distribution of soil salinity beneath and outside the membrane more uniform, the cotton emergence ratio and effective plant ratio under tillage treatment were 23.62 and 25.19 percentage points higher than that of the no-tillage treatment. Under the condition of film drip irrigation, the combination of drip irrigation and horizontal mechanical tillage was equivalent to comprehensive utilization of water conservancy improvement and guest soil improvement to saving soil salinization, and finally the spatial distribution of salt produced by mulched drip irrigation technology was from the early stage of "exterior surface accumulation profiles" and gradually changed to the later of "interior bottom accumulation profiles". The results can provide some ideas for solving the problem of soil salt surface accumulation under mulched drip irrigation, and can also provide a reference for the rational use of tillage measures under drip irrigation.

Key words: soil water and salt distribution; salt surface accumulation; mulched drip irrigation; horizontal tillage; soil improvement

0 引言

覆膜滴灌技术的应用使膜下土壤中的盐分被定向排至湿润锋周围及膜间裸地,形成盐分表聚,造成土壤次生盐碱化^[1-2]。然而,生产实践表明,盐碱地采用膜下滴灌技术后,耕作层土壤盐碱含量逐年下降、作物产量逐步上升^[3-4]。靳姗姗^[5]对不同质地(沙土、壤土、粘土)的农田土壤盐分分布情况进行了调查,发现当年开垦的不同质地农田经过1年的膜下滴灌后,其0~30 cm土层含盐量明显下降,后期年内和年间的土壤盐分分布基本处于动态平衡状态。文献[6-10]通过研究不同开垦年限土壤的盐分演变规律也得到相似结论,认为在膜下滴灌条件下,荒地开垦初期土壤剖面含盐量明显降低,随着开垦年限的增加,土壤中累积的含盐量逐渐减少,并最终趋于稳定状态。对于产生这一现象的原因,普遍认为这是由于灌溉的淋洗作用造成了土壤含盐量的降低。李朝阳等^[11]研究发现,由于各滴灌年限内滴灌带铺设位置的差异,膜内脱盐区和膜外积盐区在下一年发生位置互换,促使农田上层土壤含盐量有下降趋势。

翻耕技术作为一种处理农田土壤普遍的机械手段,不仅可以增加土壤的蓄水保墒能力、提高土壤的呼吸速率,还能够有效改善土壤的耕层结构。文献[12-18]对翻耕措施影响农田土壤问题进行了相关研究,认为翻耕不仅可以更好地提高土壤水分利用效率、增加耕层土壤孔隙度、消除土壤斥水性,还有利于增大土壤中非吸附性溶质的淋失,为作物根系生长创造有利环境。李文凤等^[19]利用染色剂法对免耕及秋耕处理的土壤进行研究,发现秋耕使土壤结构发生改变,土壤渗透率及渗透深度都明显小于免耕处理;翟振等^[20]研究了翻耕措施对土壤物理性质的影响,发现翻耕能够有效降低耕层土壤容重和穿透阻力,明显增加降水或灌溉后的水分入渗

量;崔建平等^[21]对土壤进行了不同翻耕深度(20、40、60 cm)的处理,发现翻耕深度的增加有利于降低0~20 cm耕层土壤的含盐量。

众多学者对不同耕种年限的膜下滴灌土壤水盐分布以及翻耕对土壤物理性状的影响进行了大量研究^[22-26],但对于土壤含盐量随着耕种年限的延长而呈降低趋势的现象,普遍认为是灌溉作用导致的结果,很少有学者关注翻耕对覆膜滴灌土壤盐分分布的影响。水利改良是治理土壤盐碱化过程中必不可少的先决条件,翻耕也是新疆农业生产过程中普遍应用的技术措施。本文通过室内土槽试验与田间试验相结合的方法,研究滴灌技术与翻耕措施结合对土壤盐分产生的调控效果,观测和分析覆膜滴灌土壤中水盐在不同翻耕措施下的变化机理,为解决膜下滴灌条件下裸地土壤盐分表聚问题提供思路,同时为滴灌条件下翻耕措施的合理使用提供参考。

1 材料与方法

1.1 室内试验

1.1.1 试验材料

试验于2016年6月—2017年5月在石河子大学水利与土木工程实验中心(86°3'31"E,44°18'21"N,海拔451 m)进行。试验所用玻璃土槽长×宽×高为100 cm×20 cm×80 cm。土槽底部铺设20 cm厚砾石垫层模拟透水界面,垫层上覆多孔PVC隔板(孔距50 mm),板厚10 mm。具体土槽结构如图1所示。

供试土壤取自石河子大学实验农场。比重计法分析土壤物理粘粒(粒径0~0.01 mm)质量分数为26.91%,根据卡庆斯基土壤质地分类法,可定为中壤土。土壤干容重为1.45 g/cm³、田间持水率(质量含水率)为26.46%、风干含水率(质量含水率)为1.92%。无水硫酸钠溶解后用淋喷的方法对试验用土进行配盐,配盐后的土壤含盐量为33.50 g/kg,根

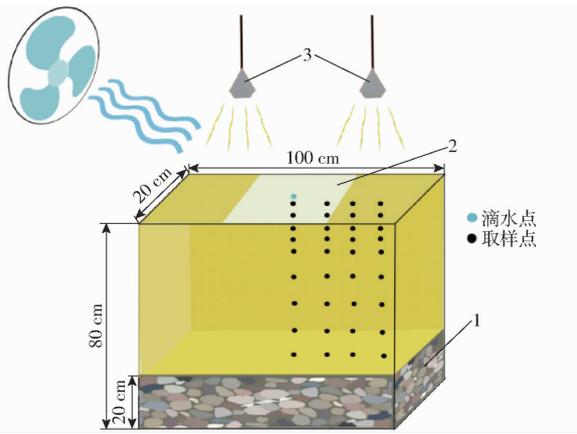


图1 土槽结构与取样点分布图

Fig.1 Soil trough structure and sampling point distribution diagram

1. 砾石层 2. 地膜 3. 红外辐射灯

据土壤盐分分级标准^[27],可定为轻盐化土壤。滴灌水矿化度为 0.35 g/L。

1.1.2 试验方法

试验所用土壤经碾压、粉碎及风干处理,过 2 mm 筛去除杂质,拌均匀后按设计容重(体积质量 1.45 g/cm³)分层装填土槽。每次装填时,将土压实至 5 cm 厚度,最终填土至 60 cm 高度。在土体表面的中间位置覆盖 30 cm × 20 cm(长 × 宽)规格的地膜(图 1)。距表土 55 cm 处悬挂 275 W 红外辐射灯,以增加表土蒸发强度,辐射灯于 10:00—21:00 为打开状态。自制微型土壤蒸发器测表土蒸发量。医用吊瓶和针头模拟滴灌供水系统进行单点源入渗试验。试验过程中,滴头流量控制为 1.8 L/h,每次灌水量均控制为 55 mm。

设置水平翻耕处理(Tillage, T)与免耕处理(No tillage, NT)进行对照试验,观测土壤随翻耕次数或免耕灌水次数的增加其含盐量的变化情况。根据土壤宜耕性原则,当 0~20 cm 土层的土壤含水率达到田间持水率的 40%~60% 时^[28],采用膜外与膜内土壤互换的方式进行翻耕,依据西北地区气候条件及农田初级耕作与次级耕作对翻耕深度的要求^[28]并结合本试验所用土壤质地,将翻耕深度定为 15 cm 左右。试验共进行 3 次翻耕,分别标注为 T1、T2、T3;翻耕前的状态标注为 T0。每次翻耕间隔 7~11 d 不等,翻耕后采用顺耙的方法^[29]将翻耕土壤耙平,再次覆膜进行灌水。翻耕处理重复 3 次。对照处理(NT)只灌水不翻耕,与翻耕处理(T)同时段进行,共灌水 4 次,分别标注为 NT1、NT2、NT3、NT4;对照处理重复 2 次。由于试验是在室内进行,试验过程中测得各处理土壤的日平均蒸发强度比较稳定(表 1)。

表 1 不同处理下土壤的日平均蒸发强度

Tab.1 Average soil evaporation rate under different

参数	翻耕处理				免耕处理			
	T0	T1	T2	T3	NT1	NT2	NT3	NT4
日平均蒸发量	2.79	3.45	3.48	3.15	2.86	3.42	3.13	3.08

1.1.3 测定指标与方法

灌水结束 96 h 后,用直径 1 cm 的土钻分别在与滴头水平距离 0 cm(膜内)、10 cm(膜内)、25 cm(膜外)及 40 cm(膜外)处取样,取样深度分别为 0~2 cm、2~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm,具体取样点位置分布见图 1。

所取土样用于测定不同翻耕措施处理下土壤的含水率及含盐量。干燥法测定土壤含水率;土壤浸提液电导率法测定土壤含盐量(DDS-11A 型数显电导率仪,上海雷磁创益仪器仪表有限公司),干燥残渣法标定土壤电导率与土壤含盐量之间的关系,标定结果为

$$C_1 = 0.00003E_c + 0.0146 \quad (R^2 = 0.9924, n = 62) \quad (1)$$

式中 C_1 ——土槽试验土壤含盐量, g/kg
 E_c ——土壤浸提液电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$
 n ——样本数

分析不同耕作措施处理下土壤的含盐量相对于初始含盐量(土壤本底值)的变化率,评估土壤的积盐或脱盐程度,计算方法为

$$\eta = \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中 ω_1 ——试验后土样盐分质量, g
 ω_0 ——初始土壤盐分质量, g
 η ——盐分相对变化率, %, 正值表示土壤积盐率, 负值则表示土壤脱盐率

1.2 田间试验

1.2.1 试验地概况

田间试验于 2019 年 3—9 月在新疆维吾尔自治区库尔勒市普惠农场(85°52'E, 41°25'N, 海拔 880 m)进行。该区常年干旱少雨、蒸发强烈,自动气象站(中科正奇科技有限公司)测定试验期间空气温度及降水情况(总降雨量 69 mm),结果如图 2 所示。

试验地土壤为沙质壤土,田间持水率(质量含水率)28.67%,孔隙率 45.75%。根据当地棉花种植模式,苗期不进行灌水,为保证棉花苗期的正常生长并减少盐分对幼苗的胁迫,2018 年 12 月对棉田进行冬灌,冬灌水量为 300 mm,灌溉水矿化度为 1.21~1.94 g/L。春耕后用 100 cm³ 环刀测定 0~

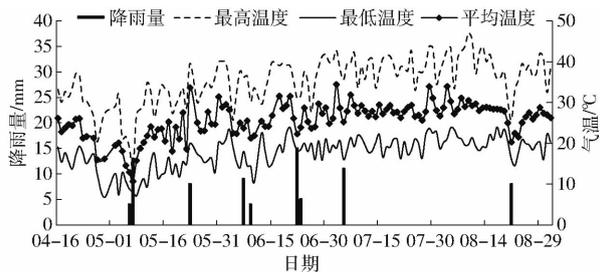


图2 试验期间大气温度及降雨量分布

Fig.2 Atmospheric temperature and rainfall distribution during experiment period

40 cm 土层土壤容重,结果如表 2 所示。生育期内的滴灌用水取自井水(矿化度为 1.54 g/L)。试验小区 0~100 cm 土层含盐量为 2.96~8.66 g/kg。试验期间测得该区地下水平均埋深 2.45 m,矿化度 3.80~7.40 g/L。

表 2 不同翻耕方式处理下田间各土层土壤容重

Tab.2 Soil bulk density of each soil layer under different ploughing methods in field g/cm³

土层深 度/cm	翻耕处理			免耕处理		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
0~20	1.23	1.15	1.19	1.51	1.47	1.49
20~40	1.52	1.40	1.46	1.55	1.47	1.51

1.2.2 试验方法

田间试验同样设置水平翻耕(T*)与免耕(NT*)两种耕作方式处理。其中,T*处理的试验区面积为 240 m²;4月15日采用水平翻耕方式进行春耕作业,翻耕深度为滴灌棉田采取的常规翻耕深度 20 cm;棉花生育期内共进行 3 次膜外(间)中耕(5月11日、5月30日、6月25日),中耕犁刀的深度可达 25 cm。NT*处理的棉田不春耕,直接播种;棉花生长期也不进行中耕,试验区面积 480 m²。

试验地种植作物为棉花,2019年4月16日播种,品种为“新陆中”系列。根据当地棉花种植及灌溉模式,采用“一膜一管四行”的方式对棉花进行种植和灌溉,覆膜宽度 115 cm,膜外(间)、膜内宽行、膜内窄行的间距分别为 30、55、25 cm,株距 10 cm。采用内径 16 mm、滴头间距 30 cm 的单翼迷宫式滴灌带进行滴灌作业,滴灌带铺设于膜下宽行中间位置,滴头设计流量为 2.2 L/h,具体种植模式见图 3。试验期间对各处理均灌水 8 次,首次灌水定额均设置为 55 mm,后期灌水定额均设置为 60 mm,生育期内的总灌水量均为 475 mm。

1.2.3 测定指标与方法

田间试验在土壤翻耕(包括春耕及中耕)前后及每次灌水前 1 天及灌水后第 2 天用钻头直径 5 cm 的螺旋土钻分别在膜内宽行、膜内窄行及膜外(间)裸地位置取土样,取样深度分别为 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm。具体取样点位置分布见图 3。每个处理均选取固定点设置 3 组重复。干燥残渣法标定土壤电导率与土壤含盐量之间的关系

$$C_2 = 0.00005E_c - 0.0194 \quad (R^2 = 0.9812, n = 60) \quad (3)$$

式中 C₂——田间试验土壤的含盐量,g/kg

分别在 5 月下旬定苗后及 8 月下旬灌水结束后,计算不同翻耕措施处理下棉花的出苗率及有效株占比率,计算公式为

$$\eta' = n'/N \times 100\% \quad (4)$$

$$\xi = \omega/\gamma \times 100\% \quad (5)$$

式中 η'——出苗率,%

n'——单位面积出苗数,株/m²

N——单位面积播种数,株/m²

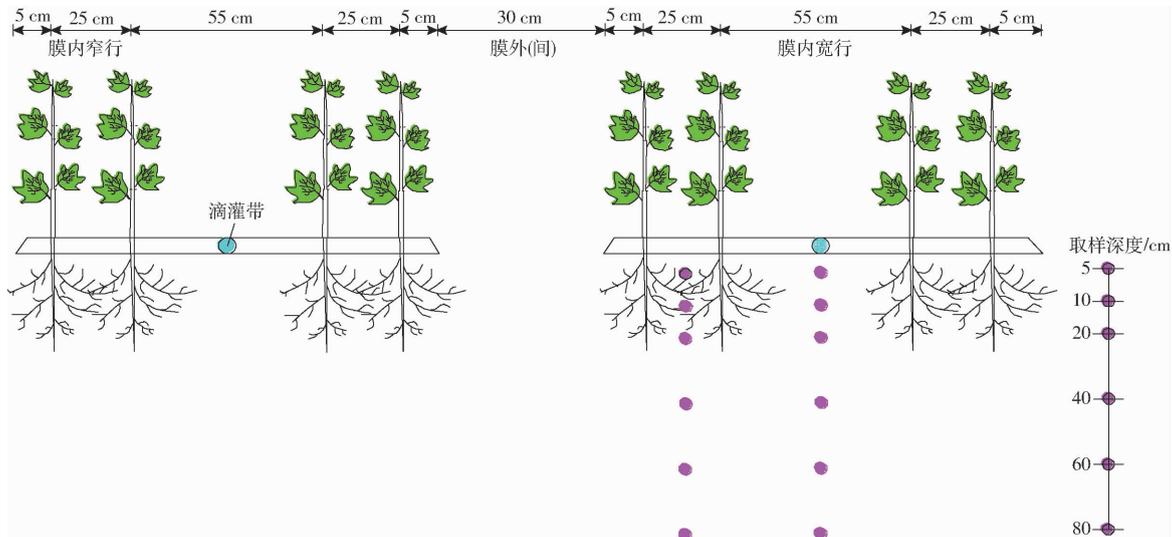


图3 田间试验棉花、滴灌管、地膜配置模式示意图及取样点分布图

Fig.3 Diagram of field test cotton, drip irrigation pipe, film pattern and sampling point location

ξ ——有效株占比率, %

ω ——单位面积有效株数, 株/ m^2

γ ——种植密度, 株/ m^2

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 处理, SPSS 20.0 软件进行不同翻耕措施处理下土壤水盐分布的差异性分析, Excel 2003 及 Photoshop CC 软件进行相应图表的绘制。

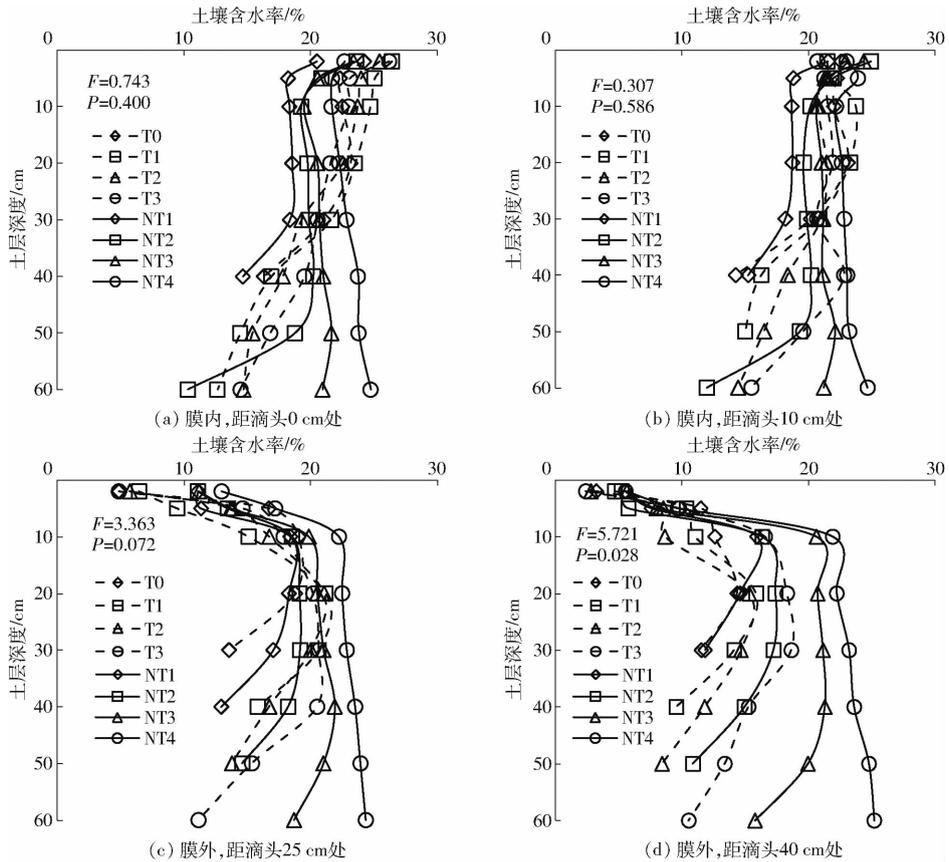


图4 免耕与翻耕处理下的土壤含水率分布

Fig. 4 Soil water distributions under no-tillage treatment and tillage treatment

深度方向,不同耕作措施处理下膜内土壤平均含水率分布差异性不显著(滴头下方 $P = 0.400$, 距滴头 10 cm 处 $P = 0.586$),但局部土层含水率分布规律略有不同。对于 0~20 cm 土层, T 处理的膜内耕层土壤平均含水率比 NT 处理的耕层土壤平均含水率高 3.66 个百分点。另外, T 处理滴水点处 0~20 cm 土层的平均含水率比距滴头 10 cm 处相同深度的土壤平均含水率高 1.87 个百分点;而 NT 处理由于薄膜边缘对土壤水分运动产生阻挡,导致滴水点处 0~20 cm 土层的平均含水率却比距滴头 10 cm 处土壤的平均含水率低 0.74 个百分点。

各处理膜内 20 cm 以下土层深度的含水率分布特点与 20 cm 以上土层的含水率分布特点相反。滴头下方及距滴头 10 cm 处,不同耕作措施处理下的土壤平均含水率分布有显著差异(滴头下方 $P =$

2 结果与分析

2.1 翻耕措施对土壤含水率分布特征的影响

室内物理试验结果显示,不同翻耕措施处理下的膜内土壤始终保持较高的含水率,其中, T 处理的膜内上层土壤含水率高于对照处理,而膜内下层土壤含水率小于对照处理。各处理膜外土壤的含水率均比膜内土壤的含水率低(图 4)。

0.052, 距滴头 10 cm 处 $P = 0.054$) (图 4a、4b),这与翻耕深度相一致, T 处理膜内下层土壤平均含水率比 NT 处理的土壤平均含水率低 4.13 个百分点。这进一步表明, T 处理可提高膜内局部土层(耕层)的蓄水能力,降低其向膜外土壤的水平扩散及向深层土壤的垂直入渗速度。

距滴头 25 cm 处的膜外土壤, T 处理下的土壤平均含水率与 NT 处理相比差异性不显著 ($P = 0.072$),但距滴头 40 cm 处,两者之间的土壤含水率分布有显著差异 ($P = 0.028$),且 T 处理的膜外土壤含水率始终小于 NT 处理(图 4c、4d)。其中,距滴头 25 cm 处, T 处理(T0~T3)的平均含水率分别比相同时段内 NT 处理(NT1~NT4)小 0.26、1.54、3.07、5.54 个百分点;在距滴头 40 cm 处,前者的含水率也分别比后者小 0.44、1.60、6.62、6.44 个百分点。这

说明 T 处理不仅对深层土壤水分的水平运移有抑制作用,同时也可减少耕层内水分的水平运移通量。

2.2 翻耕措施对土壤盐分分布特征的影响

2.2.1 室内试验土壤盐分分布特征

不同耕作措施处理下,膜内土壤呈上层脱

盐、下层积盐状态,T 处理的膜内下层积盐率大于 NT 处理。对于膜外土壤,T 处理逐渐呈现上层脱盐、下层积盐状态,而 NT 处理的土壤始终处在积盐状态且含盐量在深度方向上呈“Γ”型分布(图 5)。

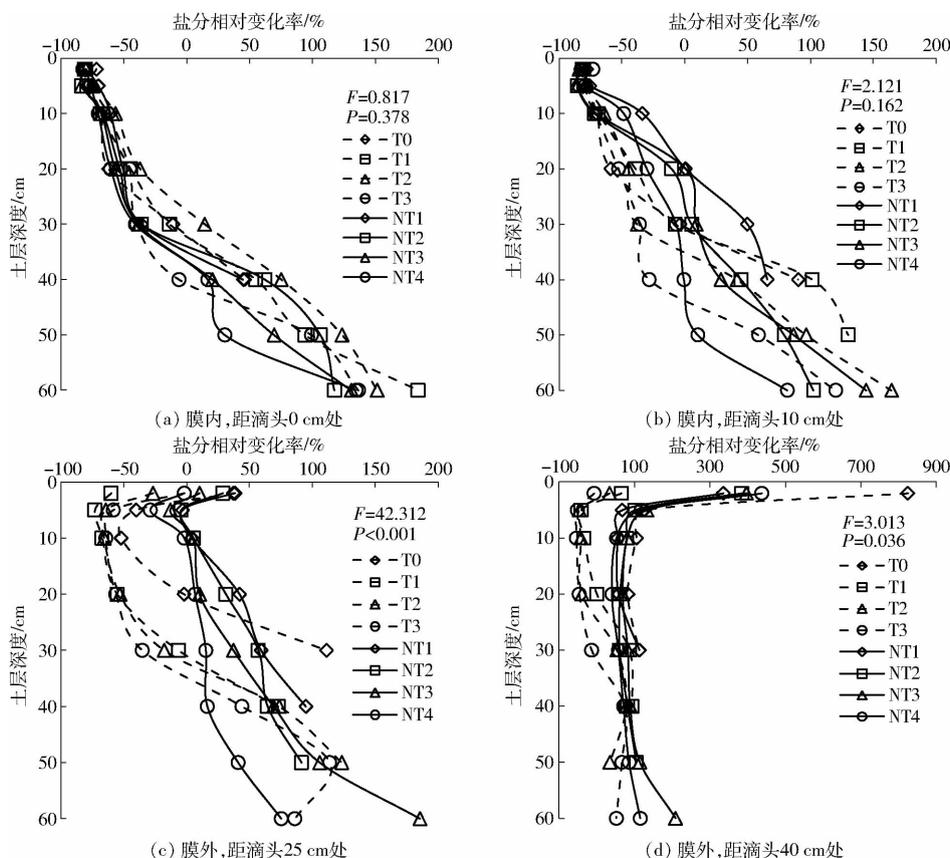


图 5 免耕与翻耕处理下的土壤盐分分布

Fig. 5 Soil salt distributions under no-tillage treatment and tillage treatment

不同耕作措施处理下,膜内土壤盐分分布差异性不显著($P>0.1$)(图 5a、5b),但局部土层的盐分分布规律略有不同。NT 与 T 处理下,膜内滴水点处的土壤脱盐深度基本都在 35 cm 以内;35 cm 以下土层呈积盐状态。其中,NT 处理的下层土壤积盐率随免耕-灌水次数的增加分别为 44.79%、285.36%、220.25%、180.98%;T 处理的积盐率明显比 NT 处理的积盐率高,随翻耕-灌水次数的增加分别为 45.72%、331.84%、363.41%、235.25%。这是因为翻耕作用将膜外部分高盐分土壤翻至膜内,再次灌水作用又将膜内土壤的这些高盐分淋洗至耕层以下的土壤中。

膜内距滴头 10 cm 处,NT 处理的土壤脱盐深度在 20 cm 左右,平均脱盐率为 -56.60%;而 T 处理的土壤脱盐深度在 30 cm 左右,平均脱盐率达 -69.84%。各处理脱盐深度以下均为积盐区;其中,NT 处理的下层土壤积盐率随免耕-灌水次数的增加分别为 115.94%、231.9%、269.31%、92.03%;T 处

理的下层土壤积盐率随翻耕-灌水次数增加也比 NT 处理高,分别为 90.32%、231.14%、302.65%、178.67%。T 处理的膜内(距滴头 0 cm 和 10 cm)下层土壤总积盐率是 NT 处理同类指标的 1.23 倍,说明翻耕后灌水对膜内土壤盐分的淋洗效果更明显,使翻耕至膜内土壤中的盐分在水分淋洗作用下聚集在膜内底层土壤。

不同耕作措施处理下的膜外土壤盐分分布有显著差异($P<0.05$)(图 5c、5d)。距滴头 25 cm 处的膜外土壤,T 处理的土壤脱盐深度明显比 NT 处理的土壤脱盐深度深,其中,NT 处理的土壤在 2~10 cm 深度范围内表现为脱盐,平均脱盐率为 -12.27%;10 cm 以下土层的积盐率随免耕-灌水次数的增加分别为 201.22%、249.70%、414.72%、153.37%。T 处理的土壤脱盐深度可达 30 cm,平均脱盐率为 -68.50%;30 cm 以下土层积盐率随翻耕-灌水次数的增加逐渐增大,分别为 111.45%、73.12%、197.47%、244.27%。

距滴头 40 cm 处的膜外土壤, NT 处理在整个土层深度范围内都处在积盐状态(图 5d); 且表土层(0~2 cm)积盐量最多, 占整个土层深度含盐量的 22.68%~34.64%, 是下层土壤含盐量的 3 倍多; 2 cm 以下土层积盐率较低, 且含盐量随免耕-灌水次数的增加变化不大。T 处理在没有进行翻耕前(T0), 表土层(0~2 cm)含盐量较高, 翻耕后(T1~T3), 表层土壤仅有少量盐分聚集, 且脱盐深度随翻耕-灌水次数的增加也逐渐加深, 由 T1 处理的 20 cm 深度逐渐增大至 T3 处理的 30 cm 深度, 平均脱盐率为 -38.89%。T 处理膜外土壤平均脱盐区范围比 NT 处理深 25 cm。说明机械翻耕作用与灌水作用相结合对降低膜外土壤含盐量效果明显。

试验数据表明, 尽管 T 处理的膜外土壤含水率并不高(图 4c、4d), 但脱盐深度却比 NT 处理的脱盐深度大, 且耕层土壤含盐量也比 NT 处理低(图 5c、5d)。这是由于试验中将膜内低盐分土壤翻到了膜外, 使膜外土壤在前一次翻耕后及后一次灌水前都比膜内土壤具有较低的含盐量(表 3)。

表 3 T 处理翻耕后灌水前的膜内、外 0~15 cm 土层含盐量

翻耕次数	土层深度/cm	距滴头 0 cm 处	距滴头 10 cm 处	距滴头 25 cm 处	距滴头 40 cm 处
1	0~5	28.96	23.74	9.28	8.92
	5~10	30.40	24.94	9.22	10.54
	10~15	36.46	26.80	9.10	9.40
2	0~5	20.26	20.56	14.02	14.08
	5~10	18.40	17.02	13.00	14.80
	10~15	16.84	17.08	13.84	13.78
3	0~5	19.66	19.78	13.90	14.08
	5~10	21.46	19.06	12.82	9.22
	10~15	20.86	17.98	15.22	12.70

数据显示, 翻耕后灌水前的膜内(距滴头 0、10 cm 处)土壤含盐量是膜外(距滴头 25、40 cm 处)

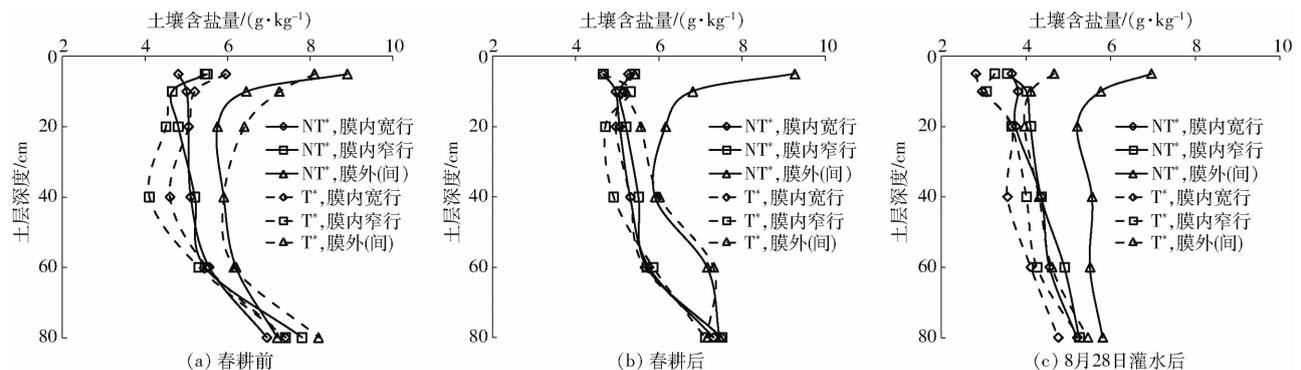


图 6 不同耕种措施处理下田间土壤盐分分布

Fig. 6 Field soil salt distributions under different tillage measures

土壤含盐量的 1.18~4.09 倍。因此, 翻耕后的膜外耕层土壤含盐量要比 NT 处理的同类指标低。这进一步表明了翻耕措施在调控覆膜滴灌条件下膜内、外土壤盐分分布方面的特殊作用, 这对于降低膜间土壤盐分表聚现象以及保证种植在地膜边缘附近作物(生产中称为边行作物)的正常生长具有积极作用。

2.2.2 田间试验土壤盐分分布特征

不同耕作措施对覆膜滴灌农田土壤的盐分分布结果显示, T^{*} 处理相比于 NT^{*} 处理对土壤盐分的扰动幅度较大; 生育期内的灌水作用结束后, T^{*} 处理的膜内、外上层土壤含盐量与春耕后相比都有所降低, NT^{*} 处理的膜外土壤呈盐分表聚特征(图 6)。

上年度覆膜滴灌技术的应用, 导致土壤盐分在原膜外(间)位置聚集; 春季温度回升使得此处土壤呈现明显盐分表聚现象(图 6a)。NT^{*} 处理的试验区内, 膜外位置的土壤含盐量分别是膜内宽行及膜内窄行位置土壤含盐量的 1.24、1.21 倍, T^{*} 处理的试验区分别为 1.25、1.37 倍。

春耕后(图 6b), 经 T^{*} 处理的耕层土壤盐分分布较为均匀, 膜内宽行、膜内窄行以及膜外位置对应的平均土壤含盐量依次为 5.64、5.43、6.11 g/kg; NT^{*} 处理的膜内宽行、膜内窄行及膜外位置的含盐量分别是 T^{*} 处理的 0.98、1.06、1.17 倍, 且膜外土壤盐分表聚现象仍十分明显。这一结果表明, 水平翻耕作用可扰动田间土壤结构, 促使耕层土壤中的盐分重新分布, 将处于膜外位置的高盐分土壤与膜内低盐分土壤重新混合, 造成膜内、外耕层土壤盐分分布更加均匀。另外, 膜外土壤含盐量的降低势必会造成膜内耕层土壤含盐量的增加, 但同时有利于生育期内灌水对膜内土壤盐分的淋洗, 使农田土壤总体含盐量降低。

如图 6c 所示, 生育期内灌水作用结束后, T^{*} 处理的膜内外土壤盐分分布规律大体相同, 膜内宽行、膜内窄行及膜外位置垂直方向上土壤的平均含盐量

依次为 3.64、3.92、4.52 g/kg, 表现为“盐分底聚型”分布, 膜外 0~10 cm 土层含盐量与春耕前相比下降 42.94%。NT^{*} 处理的土壤含盐量明显比 T^{*} 处理高, 其膜内宽行、膜内窄行及膜外位置的平均土壤含盐量依次为 4.23、4.37、5.80 g/kg。另外, 虽然 NT^{*} 处理的膜外土壤含盐量整体有所下降, 但仍有明显的盐分表聚特征, 其 0~5 cm 土层含盐量达 6.96 g/kg, 比 T^{*} 处理同类指标高 2.30 g/kg。

棉花作为一种比较耐盐碱的非盐生植物, 在萌芽出苗和幼苗阶段对盐分最为敏感^[30], 对不同耕作措施处理下棉花的出苗率及有效株占比进行统计, 结果如表 4 所示。

表 4 棉花出苗率及有效株占比

Tab. 4 Cotton emergence ratio and effective plant ratio

处理	种植密度/ (万株·hm ⁻²)	总出苗 率/%	总有效株 占比/%	边行出苗 率/%	边行有效株 占比/%
NT [*]	24.012	65.32	60.59	56.99	53.26
T [*]	24.012	88.94	85.78	85.27	82.79

数据显示, T^{*} 处理可有效提高棉花出苗率及有效株占比, 总出苗率及总有效株占比分别比 NT^{*} 处理高 23.62、25.19 个百分点。随着棉花生育期的延长, T^{*} 处理的棉花存活率也高于 NT^{*} 处理, T^{*} 处理的总出苗率与总有效株占比之间的差值为 3.16 个百分点, NT^{*} 处理为 4.73 个百分点。这可能是由于 NT^{*} 处理的膜内、外表土含盐量均较高, 出现在棉花生育期内的降雨再次提高了表土积盐率, 使根层土壤盐分超过了棉花出苗及苗期生长的耐盐值; 另外, NT^{*} 处理较高的根层土壤容重降低

了土壤的通气性及提墒性^[21], 环境不利于棉花出苗及生长, 使 NT^{*} 处理的棉花出苗率及存活率都比 T^{*} 处理低。不同耕作措施处理下, 边行作物的出苗率及有效株占比均低于相应的总体值, 说明边行作物受土壤盐分胁迫的影响要高于内行。

2.3 翻耕处理下土壤含水率与含盐量之间的关系

覆膜滴灌条件下, 灌水及翻耕作用对土壤水盐分布都具有显著影响。为进一步探求覆膜滴灌土壤在翻耕处理下膜内、外土壤含水率与含盐量之间的关系, 将室内物理试验及田间试验的膜内、外土壤含水率及含盐量进行线性回归, 结果如图 7 所示。

覆膜滴灌条件下, 膜内土壤盐分随灌溉水淋洗到土壤底层, 灌水量相同时, 膜内土壤含盐量越高, 淋洗到底层土壤中盐分的量就越大。对于室内土槽试验(图 7a~7d), 膜内土壤含水率与含盐量之间在不同翻耕次数处理下均呈显著的线性负相关关系, 决定系数不小于 0.9339。这进一步说明, 膜内土壤中的盐分受水分淋洗作用明显。

膜外土壤含水率与含盐量之间的相关性明显较弱。除翻耕前(T0)(图 7a), 膜外土壤含水率与含盐量之间具有较明显的线性负相关(决定系数为 0.9671)以外, 首次翻耕(T1)(图 7b)所对应的土壤含水率与含盐量之间不再呈线性关系(决定系数为 0.0345), 随翻耕次数的增加(T2、T3), 两者之间的决定系数依然很低, 不大于 0.0316。这表明膜外土壤含盐量的降低不完全取决于水分作用, 实际上翻耕措施起了主导作用。

田间试验结果与室内土槽试验结果规律性大体

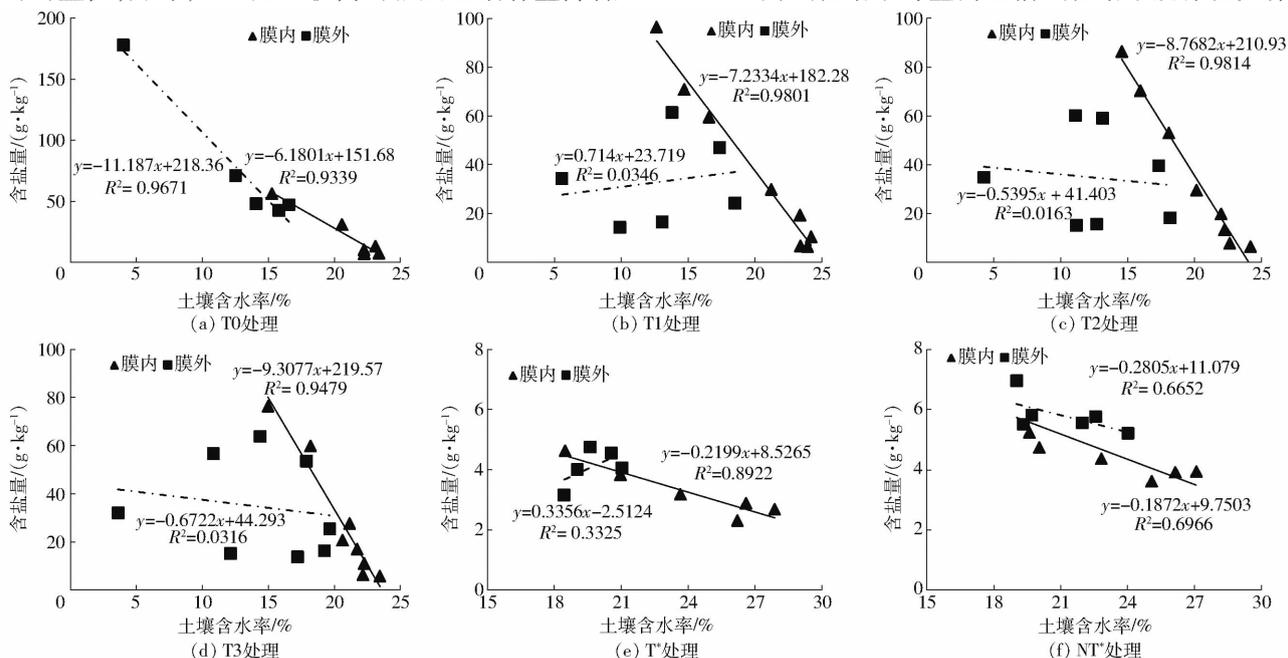


图 7 土壤含水率与含盐量之间的关系

Fig. 7 Relationship between soil water content and salt content

相同。 T^* 处理下(图7e),膜内土壤含盐量与含水率之间具有较高的线性相关性(决定系数为0.8922),而膜外土壤含盐量与含水率之间的相关性明显较低(决定系数为0.3325)。对于田间试验的 NT^* 处理(图7f),膜内外土壤含水率与含盐量之间的决定系数大于0.6;说明在 NT^* 处理下,膜内及膜外土壤含盐量的降低依赖于水分的影响均比较大, T^* 处理其膜外土壤盐分分布受水分的影响不如 NT^* 处理明显。

膜下滴灌条件下的土壤水盐分布受多种因素影响,水利作用及翻耕措施是其中的两个重要因素。滴灌淋洗和机械翻耕都可使土壤盐分分布状况发生改变,这实际上是土壤盐分在水利改良与客土改良相结合作用下产生了效果。

3 讨论

本研究分别在室内土槽和田间对土壤进行免耕与水平翻耕处理,对比观察不同翻耕措施对覆膜滴灌土壤水盐分布的调控作用。从试验结果发现,翻耕作用可疏松耕层土壤结构,室内土槽试验的耕层土壤高度比首次灌水前高1.8 cm左右,田间试验也表明,翻耕作用使上、下层土壤容重明显不同(表2),这对土壤基质势与含水率之间的关系以及土壤的机械特性都产生了影响^[31-32]。因此,可将翻耕后的土壤以耕层为分界线视为两种不同结构的土壤;其中,分界线以上的土层对水分的滞留作用大于下层土壤,增加了上层土壤的蓄水能力^[33],为膜内上层土壤压盐积聚了水量;另外,上层土壤含水率的增大也增强了水分对土壤盐分的溶解程度^[34],使土壤水分在下渗过程中所携带的盐分增加。

翻耕处理的膜内深层土壤含水率低于免耕处理(图4a、4b),但其相应的积盐率却比免耕处理大(图5a、5b);同时,翻耕处理的膜外土壤含水率也小于免耕处理(图4c、4d),而相同深度处土壤的脱盐率却大于免耕处理(图5c、5d),这与土壤脱盐需要大量水分的结论相违背。这是因为本研究采用的是膜内与膜外土壤互换的水平翻耕措施,使翻耕后、灌水前的膜外土壤含盐量低于膜内土壤的含盐量(表3);且翻耕处理的膜内上层土壤比下层土壤疏松,其蓄水能力增大,为溶解膜内土壤所增加的盐分提供了条件;在此情况下,尽管上层土壤的水分下渗量少于免耕处理,但是由于水分中溶解的盐分多,所以膜内深层土壤积盐率较高。由此产生的结果是,随着翻耕-灌水次数的增加,土壤盐分的空间分布由早期的“膜外表聚型”逐渐向后期的“膜内底聚型”转变。

田间试验结果表明,春耕前,膜内区域的土壤在40 cm深度处出现盐分突变,膜外区域土壤在20 cm附近(耕层以下)出现盐分突变,突变点以下的土壤含盐量随深度增加而增大(图6a),说明春季升温作用导致地下水向上层运动,并携带土壤盐分向上运移。但春耕后(图6b),膜外0~20 cm土层的含盐量经水平翻耕处理后明显降低,灌水后其平均含盐量比免耕处理低2.02 g/kg(图6c);尽管地下水仍然存在,但水平翻耕作用对膜外土壤盐分的抑制效果很显著。另外,生育期内的中耕作用疏松了膜外(间)土壤结构,使存在于土壤中的上升毛管水结构断裂,造成土壤盐分很难再次聚集于膜间地表。最终,经水平翻耕处理下的田间土壤盐分分布也由春耕前的“膜外(间)表聚型”逐渐向灌水后的“膜内底聚型”转变。

免耕处理下,膜外表层土壤中的盐分很难被滴灌淋洗到土壤深层。但是,采用水平翻耕措施可使膜外表层土壤盐分翻耕至膜内,经膜下滴灌作用淋洗到土壤深层,从而给聚集在膜外表层土壤中的盐分提供了淋洗出路,使农田土壤含盐量整体下降。

根据室内土槽试验的结果,滴灌农田逐年坚持水平翻耕,可以起到很好的治理膜外土壤盐分表聚的效果。当前生产中采用的翻耕多为倾斜翻耕^[35],即土壤上下翻,也有部分水平翻,仍然可以起到部分水平翻耕的作用。田间试验不仅验证了室内物理试验的理论结果,解释了田间土壤盐分随覆膜滴灌技术使用年限的增加呈逐渐降低趋势的基本原理,更为覆膜滴灌技术产生的盐分表聚现象的治理提供了基本思路。

在治理土壤盐碱化的技术领域,水利改良一般为首选措施,膜内土壤随灌水次数的增加而脱盐的现象就是水利改良的效果;而在翻耕措施下,膜内低盐土壤与膜外高盐土壤之间的互换使得膜外土壤含盐量降低是客土改良的效果。将客土翻耕技术作为治理膜外土壤盐分表聚的一种机械手段与水利改良措施相结合,对于减缓膜下滴灌技术产生的膜外土壤盐分表聚现象具有显著效果。前人的研究结果表明^[6-10],田间土壤含盐量随着膜下滴灌技术使用年限的增加呈逐渐降低趋势,本试验结果表明,这一现象不一定单纯是由灌溉导致的,翻耕作用在其中可能也产生了重大影响。新疆农田每年要进行一次秋耕(或春耕),根据种植作物的不同,有时还要进行多次中耕,这都给膜内、外土壤盐分的治理提供了有利条件,特别是播种前的首次翻耕(即春耕或秋耕)作用对于降低土壤含盐量意义重大。当然,不同耕作措施处理下的土壤水盐动态变化规律、水盐

平衡规律等问题还需要深入探究。

4 结论

(1)覆膜滴灌条件下,翻耕可提高膜内耕层土壤的蓄水能力,降低土壤水平渗吸能力及垂直扩散能力。试验结果表明,翻耕处理的膜内耕层土壤平均含水率比免耕处理高3.66个百分点,耕层以下土壤的平均含水率比免耕处理低4.13个百分点。

(2)覆膜滴灌条件下,膜内土壤盐分分布受水分淋洗作用影响较大,膜外土壤的盐分分布主要受

翻耕影响;翻耕处理的膜内下层土壤总积盐率是免耕处理的1.23倍,膜外土壤平均脱盐区范围比免耕处理深25 cm。翻耕处理下的棉花总出苗率及总有效株占比率分别比免耕处理高23.62、25.19个百分点。

(3)水平翻耕可有效降低膜外表土层含盐量,水平翻耕技术与膜下滴灌技术相结合相当于综合利用水利改良与客土改良治理农田土壤盐碱化,最终可使土壤盐分空间分布由早期的“膜外表聚型”逐渐向后期的“膜内底聚型”转变。

参 考 文 献

- [1] 牟洪臣,虎胆·吐马尔白,苏里坦,等.不同耕种年限下土壤盐分变化规律试验研究[J].节水灌溉,2011(8):29-31,35.
MU Hongchen, HU DAN-Tumarbay, SU Litan, et al. Experimental research on salty soil profiles transfer law land different farming times[J]. Water Saving Irrigation, 2011(8): 29-31,35. (in Chinese)
- [2] 刘洪亮,褚贵新,赵风梅,等.新疆棉区长期膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化与次生盐渍化趋势分析[J].中国土壤与肥料,2010(4):12-17.
LIU Hongliang, CHU Guixin, ZHAO Fengmei, et al. Study on the variation and trend analysis of soil secondary salinization of cotton field under long-term drip irrigation condition in northern Xinjiang[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 12-17. (in Chinese)
- [3] 谭军利,康跃虎,焦艳平,等.不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J].农业工程学报,2008,24(6):59-63.
TAN Junli, KANG Yuehu, JIAO Yanping, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt affected field under mulch-drip irrigation in different planting years[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 59-63. (in Chinese)
- [4] 殷波,柳延涛.膜下长期滴灌土壤盐分的空间分布特征与累积效应[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):228-231.
YIN Bo, LIU Yantao. Spatial distribution and accumulation pattern of soil salinity with long term drip irrigation under plastic mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 228-231. (in Chinese)
- [5] 靳姗姗.干旱地区膜下滴灌条件下水盐运移规律及防治盐碱化的研究[D].西安:长安大学,2011:46.
JIN Shanshan. Study on water and salt transport features and salinity control under the condition of drip irrigation in arid area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011: 46. (in Chinese)
- [6] 李明思,刘洪光,郑旭荣.长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J].农业工程学报,2012,28(22):82-87.
LI Mingsi, LIU Hongguang, ZHENG Xurong. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 82-87. (in Chinese)
- [7] 李宝富,熊黑钢,张建兵,等.不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究[J].土壤学报,2010,47(3):429-438.
LI Baofu, XIONG Heigang, ZHANG Jianbing, et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 429-438. (in Chinese)
- [8] 卢响军,武红旗,张丽,等.不同开垦年限土壤剖面盐分变化[J].水土保持学报,2011,25(6):229-232.
LU Xiangjun, WU Hongqi, ZHANG Li, et al. Changes of soil profiles salt on different reclaimed years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 229-232. (in Chinese)
- [9] 明广辉,田富强,胡宏昌.地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J].农业工程学报,2018,34(5):90-97.
MING Guanghui, TIAN Fuqiang, HU Hongchang. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 90-97. (in Chinese)
- [10] 周丽,王玉刚,李彦,等.盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J].干旱区地理,2013,36(2):285-291.
ZHOU Li, WANG Yugang, LI Yan, et al. Effects of cultivation on soil salinity in upper soil profiles of the saline-alkali land [J]. Arid land Geography, 2013, 36(2): 285-291. (in Chinese)
- [11] 李朝阳,王振华,郑旭荣,等.膜下滴灌应用年限对盐碱荒地土壤盐分的调控[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(6):696-701.
LI Zhaoyang, WANG Zhenhua, ZHENG Xurong, et al. Different years of drip irrigation under film application in saline and uncultivated land to control soil salt[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(6): 696-701. (in Chinese)
- [12] LICHT M A, AL-KAISI M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1/2): 233-249.
- [13] TU C, LI F, QIAO Y, et al. Effect of experimental warming on soil respiration under conventional tillage and no-tillage farmland in the north China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 967-979.
- [14] WILSON C E, KEILING T C, MILLER D M, et al. Tillage influence on soluble salt movement in silt loam soils cropped to paddy rice[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1771-1776.

- [15] 王旭东, 张霞, 王彦丽, 等. 不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 229-237.
WANG Xudong, ZHANG Xia, WANG Yanli, et al. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool composition in dark loessial soil on Loess Plateau[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 229-237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171128&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.028. (in Chinese)
- [16] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 翻耕法对土壤斥水性改良效果[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 479-484.
CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Amelioration effect of water repellency by tillage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 479-484. (in Chinese)
- [17] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.
LI Yuyuan, SHAO Ming'an. Impact of tillage on water transformation and runoff sediment yielding characteristics on slope land[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 46-50. (in Chinese)
- [18] 王辉, 王全九, 邵明安, 等. 翻耕与压实对坡地土壤溶质迁移过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 21-25,86.
WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an, et al. Influence of tillage and compaction on solute transport process on the sloping land[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 21-25,86. (in Chinese)
- [19] 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1506-1510.
LI Wenfeng, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1506-1510. (in Chinese)
- [20] 翟振, 李玉义, 郭建军, 等. 翻耕对土壤物理性质及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 116-123.
ZHAI Zhen, LI Yuyi, GUO Jianjun, et al. Effect of tillage depth on soil physical properties and yield of winter wheat - summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 116-123. (in Chinese)
- [21] 崔建平, 田立文, 郭仁松, 等. 深翻耕对连作滴灌棉田土壤含水率及含盐量影响的研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 134-139.
CUI Jianping, TIAN Liwen, GUO Rensong, et al. Effect of deep tilling on soil moisture content and salinity content of drip irrigation cotton continuous cropping[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12): 134-139. (in Chinese)
- [22] SCHOLTZ T, BIDLÉ MANT F. Modelling of the long-term fate of pesticide residues in agricultural soils and their surface exchange with the atmosphere: Part I. Model description and evaluation[J]. Science of the Total Environment, 2006, 368(2/3): 823-838.
- [23] ZHANG B, HE H, DING X, et al. Soil microbial community dynamics over a maize (*Zea mays* L.) growing season under conventional-and no-tillage practices in a rainfed agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 153-160.
- [24] TEODOR R. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2014, 2(4): 42-49.
- [25] 任景全, 王连喜, 陈书涛, 等. 免耕与翻耕条件下农田土壤呼吸的比较[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 388-393.
REN Jingquan, WANG Lianxi, CHEN Shutao, et al. Comparison of soil respiration from farmland under no-tillage and tillage regimes[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(3): 388-393. (in Chinese)
- [26] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 149-159.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 149-159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140824&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.024. (in Chinese)
- [27] 王遵亲, 祝寿全, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [28] 曹敏建. 耕作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [29] 龚振平, 邵孝侯, 张富仓, 等. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 107.
- [30] 王兴鹏. 冬春灌对新疆土壤水盐动态和棉花生长的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
WANG Xingpeng. Effects of winter-spring irrigation on water-salt dynamics and cotton growth[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [31] ALLBROOK R F. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for soil physics[J]. Australian Journal of Soil Research, 1992, 31(2): 111-118.
- [32] YONG R N, WARKENTIN B P. Soil properties and behavior[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1975.
- [33] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 等. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 16(9): 66-71.
SUN Guofeng, ZHANG Hailin, XU Shangqi, et al. Effects of rotational tillage treatments on soil structure and water storage in double rice cropping region[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 16(9): 66-71. (in Chinese)
- [34] 周发超. 饱和和非饱和土壤中溶质的溶解-结晶-二相模型初探[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 81.
ZHOU Fachao. Crystallization and resolution modeling based on two-phase solute transport in variably saturated soil[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 81. (in Chinese)
- [35] 黄玉祥, 杭程光, 宛婵婷, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, WAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)