

覆膜滴灌条件下的土壤盐分表聚特征研究

陈文娟¹, 李明思^{2*}, 李清林², 李东伟²

(1.石河子大学 理学院, 新疆石河子 832000;

2.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000)

摘 要:【目的】探究新疆地区覆膜滴灌农田膜外土壤盐分表聚特征。【方法】以沙土和壤土为研究对象, 通过室内试验, 对 2 种质地的土壤分别进行了高蒸发强度和低蒸发强度处理, 观测了覆膜滴灌条件下土壤盐分的水平分布和垂直分布; 不同温度处理下, 对 2 种质地的土壤进行了盐分表聚发展过程试验。【结果】覆膜滴灌条件下, 2 种土质的表层含盐量随距滴头水平距离呈指数函数分布; 膜外土壤垂直剖面上的含盐量呈“Γ”型分布, 盐分主要聚集在表层土壤中。其中, 高蒸发强度处理下, 沙土表层(0~2 cm)的平均含盐量是 2 cm 以下土层平均含盐量的 7.3 倍, 壤土表层(0~2 cm)的平均含盐量是 2 cm 以下土层平均含盐量的 8.4 倍; 低蒸发强度处理下, 沙土和壤土的对应数值分别是 7.2 倍和 7.9 倍。影响土壤盐分表聚的主要因素是土壤水分的蒸发速率; 土壤含水率、环境温度和蒸发强度的提高都可以增大土壤水分蒸发速率, 导致土壤表面盐分聚集量增加, 其中, 土壤含水率所起的作用最大。土壤水分对盐分的溶解度随含水率的降低而下降, 导致蒸发过程中盐分表聚速率存在峰值, 而且峰值基本与环境温度正相关。【结论】土壤水分汽化散失使盐分从溶液中离析是导致土壤盐分表聚的本质; 蒸发作用下, 壤土的盐分表聚速率比沙土的盐分表聚速率高。

关 键 词: 覆膜滴灌; 土质; 盐分表聚; 聚集速率

中图分类号: S-3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021389

OSID:



陈文娟, 李明思, 李清林, 等. 覆膜滴灌条件下的土壤盐分表聚特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 93-100.

CHEN Wenjuan, LI Mingsi, LI Qinglin, et al. Salt Accumulation and Distribution under Mulched Drip Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 93-100.

0 引 言

【研究意义】新疆地区不仅干旱缺水, 而且土壤盐渍化分布面积广, 占灌区耕地总面积的 32.07%^[1]。膜下滴灌被视作是高效节水及驱盐的主要技术, 在该地区得到广泛应用^[2]。但由于膜下滴灌技术“浅灌勤灌”的特点, 使得其在理论上达不到淋洗脱盐的效果, 只能将土壤盐分压制在根层以下及趋离到膜外空间^[3-4], 在地表蒸发作用下膜外土壤出现盐分表聚特征^[5-7]。土壤盐分表聚现象将驱动灌区土地资源的演变, 从而影响区域生态环境^[8]。因此, 掌握膜下滴灌条件下的土壤盐分表聚特征是新疆地区研究土壤盐渍化治理技术的重要依据, 也是改良与利用盐碱地需要解决的首要问题^[9]。

【研究进展】盐分表聚是一个复杂的过程, 许多因素都会影响到该过程的演变, 如土壤含水率、土壤含盐量、环境温度、环境湿度、土壤质地、土壤水力

特性等。Yakirevich 等^[10]通过试验和数学模型分析了地表蒸发速率与表土溶液浓度之间的关系。Grunberger 等^[11]指出在蒸发作用下运移到地表的盐分会产生结晶, 沉淀后将堵塞土壤毛管孔隙, 从而增加水汽扩散的阻力。另外, 有学者针对盐分表聚对土壤理化性质及生态环境的影响等问题开展了相关研究。李小刚等^[12]指出, 随着表土含盐量的增加, 土壤团聚体的稳定性显著降低, 黏粒的分散性显著增加; 且含盐量的增加会显著降低土壤的蒸发速率。Fujimaki 等^[13]认为表土含盐量的高低影响土壤溶液浓度, 从而改变土水势, 影响表土水分运行和盐分迁移。彭振阳等^[14]指出, 在土壤盐分没有结晶时, 溶质势是引起地表蒸发速率降低的主要原因; 当地表土壤存在水盐补给时, 含盐土壤的蒸发速率明显降低。赵莉等^[15]认为表层土壤盐分的富集会严重危害作物的生长。刘东伟等^[16]总结了地面表聚盐分在风蚀作用下形成的盐尘暴及其对生态环境的影响, 指出盐尘暴会加速内陆河河源的冰雪消融, 对植物叶片气孔的呼吸有阻碍作用, 甚至会毒害植物。

【切入点】前人对土壤盐分表聚的研究重点均放在了盐分表聚的“后果”上面, 而关于盐分表聚的过程和机理问题则阐述的不多。实际上土壤盐分表聚因

收稿日期: 2021-08-21

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790533), 石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK2021B05)

作者简介: 陈文娟(1992-), 女, 新疆库尔勒人。讲师, 博士, 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, 新疆乌苏人。教授, 博士生导师, 博士, 主要从事灌溉原理与新技术应用研究。E-mail: leemince-709@163.com

题在多个技术领域都会对人们的生产和生活产生不同程度的影响,了解其产生的机理和影响因素对寻找应对该问题的策略很有帮助。【拟解决的关键问题】本研究以盐碱土为研究对象,通过室内试验探究膜下滴灌条件下盐分表聚的动态变化过程和土壤水盐运移机制,揭示盐分聚集速率与水、热、盐之间的相互作用机理。研究结果可为深入了解覆膜滴灌农田土壤水盐运动规律提供帮助。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 滴灌条件下盐分分布特征试验

试验于 2018 年 6—10 月在石河子大学水利建筑工程学院实验中心(86°03'31"E, 44°18'21"N, 海拔 451 m)进行。试验系统由滴灌供水装置、土槽、蒸发强度模拟装置等组成。其中,采用医用吊瓶和针头模拟滴灌供水装置,吊瓶距土体表面 2 m 高处。试验土槽由透明有机玻璃制成,尺寸为 100 cm×20 cm×80 cm(长×宽×高),土槽底部铺设 20 cm 厚砾石垫层模拟透水界面,垫层上覆 10 mm 厚、相邻孔距为 50 mm 的多孔 PVC 隔板,板上依次放置与隔板面积大小相同的纱网及滤纸(防止土粒堵塞多孔板及装土过程中土粒泄漏至砾石垫层),然后再装土。蒸发强度

表 1 供试土壤基本理化特征

Table 1 Soil basic physicochemical characteristic

土壤类型	黏粒量(<0.01 mm)/%	土壤干体积质量/(g·cm ⁻³)	风干含水率/%	田间持水率/%	孔隙率/%	含盐量/(g·kg ⁻¹)
沙土	8.68	1.58	1.57	17.39	39.79	14.72
壤土	26.91	1.45	1.92	26.46	42.07	33.50

注 表中含水率均为质量含水率(%)。

1.1.2 表层土壤盐分累积过程试验

由于该试验以表层土壤为研究对象,为避免土壤水盐运动对蒸发过程产生影响,参照彭振阳等^[14]设计的单位厚度土层装置模拟表土蒸发过程。试验于 2018 年 11 月—2019 年 2 月在石河子大学水利建筑工程学院实验中心进行。试验装置由蒸发皿及恒温箱组成。蒸发皿为圆柱形,内径 120 mm。为了便于控制和监测试验过程中的环境参数,蒸发试验在恒温箱中进行。试验所用滴水装置、土壤质地与 1.1.1 节相同。所用沙土及壤土的盐分本底值分别为 23.52、24.42 g/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 滴灌条件下盐分分布特征试验

土壤经风干、碾碎、过 2 mm 筛后拌均匀按设计土壤体积质量分层装填入土槽内。最终填土至 60 cm 高度。装土完成后使土体自然稳定 1 d 后开始试验。滴灌前,在土槽表面的中间位置覆盖 30 cm×20 cm(长×宽)规格的地膜,膜边缘埋入土内 1.5 cm,滴

模拟装置由 275 W 红外线辐射灯及可调速风扇组成。红外线辐射灯悬挂在距表土 55 cm 处,风扇放置在距土槽 3 m 处。具体试验装置如图 1 所示。

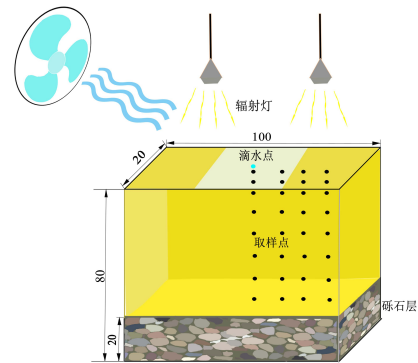


图 1 土槽结构与取样点分布图(单位: cm)

Fig.1 Soil trough structure and sampling point distribution diagram (Unit: cm)

试验采用 2 种质地土壤进行,土壤均取自石河子大学实验农场 0~20 cm 深度的耕作层。采用环刀法测定土壤干体积质量,采用排水法测定土壤田间持水率。根据新疆盐碱土土壤类型^[17],采用无水硫酸钠溶解后用淋喷的方法对试验用土进行配盐,筛分法及比重计法测定其粒径组成,土壤颗粒分级采用卡庆斯基制土壤分类法^[18],土壤理化特征见表 1。

水点距膜边 15 cm(图 1)。滴头流量控制在 1.8 L/h,灌水量为 55 mm,滴灌水矿化度为 0.35 g/L。

设置通风干燥处理(TF)及通风加表土辐射干燥处理(TFFS)进行对照试验,观测膜下滴灌条件下不同质地土壤在不同蒸发强度下的盐分分布特征。其中,通风干燥处理是在滴灌结束后采用调速风扇调控蒸发强度;而通风加表土辐射处理是在滴灌结束后采用 275 W 红外线辐射灯及风扇共同调控蒸发强度。红外线辐射灯及风扇均于每日 10:00—21:00 为打开状态。自制微型土壤蒸发器测表土日蒸发量。具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案布置及土壤日平均蒸发量

Table 2 Arrangement of test scheme and daily average evaporation of soil

土质	蒸发处理	灌水量/mm	日平均蒸发量/(mm·d ⁻¹)	重复次数
S	TFFS	55	2.82	3
S	TF	55	1.91	3
L	TFFS	55	2.79	3
L	TF	55	1.79	3

注 S 表示沙土; L 表示壤土。

1.2.2 表层土壤盐分累积过程试验

培养皿中沙土和壤土的质量分别为 330、300 g，干体积质量与土槽中的值相同；对其分别滴水 90 mL，滴水矿化度为 0.15 g/L。滴水结束后称样品总质量（滴灌后的土壤+培养皿），然后将其放入恒温箱中。对沙土和壤土分别设置 6 个温度处理（20、25、30、35、40、45 °C），共计 12 个处理，每个处理设置 6 组重复。试验过程中定时从恒温箱中取出样品并称其质量；同时，提取土壤表层 2 mm 厚度土样测相应的表层含盐量，计算土壤含水率与表层含盐量之间的相互关系。直到土样质量含水率变化幅度在 $\pm 5\%$ 范围内为止，结束该温度条件下的试验。

1.3 样品测试

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

1) 土壤盐分的测定及计算

用土壤浸提液电导率法表征土壤含盐量。将土样磨碎、过 1 mm 筛后按 1:10 制成水土混合溶液，过滤后提取上清液，用电导率仪（DDS-11A 数显）测定上清液电导率值；干燥残渣法标定土壤电导率与含盐量之间的对应关系。供试土壤标定曲线如下：

沙土：

$$S=0.000\ 03\times Ec+0.008\ 0\ (R^2=0.982\ 4,\ n=45),\ (1)$$

壤土：

$$S=0.000\ 03\times Ec+0.014\ 6\ (R^2=0.992\ 4,\ n=62),\ (2)$$

式中： Ec 为土壤浸提液电导率值 ($\mu S/cm$)； S 为土壤含盐量 (g/kg)； n 为样本数。

分析土壤相对于初始含盐量的变化率，其计算式为：

$$\eta = \frac{w_1 - w_0}{w_0} \times 100\%,\ (3)$$

式中： w_1 为试验后土壤含盐量 (g/kg)； w_0 为土壤初始含盐量 (g/kg)； η 为相对于土壤初始含盐量的变化率 (%)；正值表示土壤积盐，负值表示土壤脱盐。

2) 土壤盐分离析速率，其计算式为：

$$\kappa = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1},\ (4)$$

式中： S_2 为某一时间段末 (t_2) 土壤盐分离析量 (g/kg)； S_1 为某一时间段初 (t_1) 土壤盐分离析量 (g/kg)； κ 为土壤盐分离析速率 ($g\ kg^{-1}/h$)。

2 结果与分析

2.1 不同质地土壤的盐分分布特征

图 2 是覆膜滴灌条件下沙土 (S) 和壤土 (L) 在膜内（滴头下方、距滴头水平距离 10 cm）及膜外（距滴头水平距离 25 cm、距滴头水平距离 40 cm）的盐分分布情况。由图 2 可知，膜下滴灌条件下，膜内土壤均呈上部脱盐、下部积盐现象；在膜内与膜外交界处则是土壤脱盐与土壤积盐并存；而膜外湿润锋处的土壤基本都呈积盐现象，且表土层 (0~2 cm) 积盐率最高，整个土壤剖面含盐量呈明显“Γ”形分布。相同处理下，灌水对沙土脱盐效果比对壤土脱盐效果好。

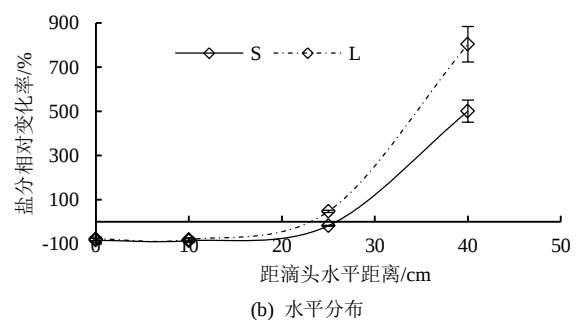
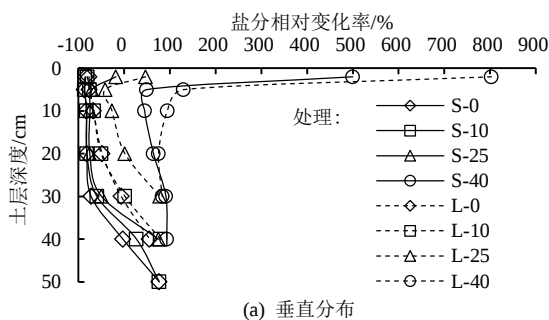


图 2 不同土质下土壤盐分分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil salinity under different soil types

由多孔介质水量平衡原理可知，在土壤持水能力一定的条件下，水分由土水势高处向土水势低处运动，土壤湿润区体积由滴水点向周围逐渐扩大^[19]。膜内上部土壤距离滴水点近，土水势高，水分推动盐分由膜内上部土壤向四周运动，形成了上部脱盐、下部积盐的状态。由于沙土的黏粒量低于壤土，提高了土壤毛管的纵向传导能力^[20]，所以，灌水对沙土的脱盐效果比壤土好，沙土形成的脱盐区范围也比壤土大。

如图 2 (a) 所示，沙土 (S) 膜内滴头下方土壤的积盐层出现在 40 cm 深度处，对应的上层土壤平均脱盐率为 -81.43%。随着距滴头水平距离的增加，积盐层及相应的上层土壤平均脱盐率分别变浅及降低。距滴头 10 cm (膜内) 处的土壤积盐层比滴头下方的浅 4 cm，平均脱盐率比滴头下方的值低 2.25%。距滴头 25 cm (膜外) 处的土壤积盐层出现在 33.5 cm 深度处，上层土壤平均脱盐率为 -57.62%。距滴头 40 cm

处的膜外土壤垂直剖面上的含盐量呈明显“Γ”型分布,盐分主要聚集在表层土壤中,其0~2 cm土层的平均含盐量是2 cm以下土层平均含盐量的7.3倍。

相同处理下,壤土(L)的盐分分布规律与沙土(S)的相比较为类似,但其脱盐深度及上层土壤平均脱盐率比沙土的值低。滴头下方壤土的积盐层比相同处理下沙土的值浅9 cm,壤土上层平均脱盐率比沙土的同类指标低13.37%;距滴头10 cm(膜内)、25 cm(膜外)处的壤土积盐层分别比沙土的值浅6、13.5 cm,壤土上层平均脱盐率分别比沙土的同类指标低10.94%、23.56%;而距滴头40 cm处的膜外,壤土在整个土层深度都表现为积盐状态,表层(0~2 cm)的平均含盐量是2 cm以下土层平均含盐量的8.4倍,是相同条件下沙土的1.61倍。

如图2(b)所示,2种土质的表层含盐量随距滴头水平距离呈指数函数分布。相同处理下,壤土(L)的膜内表层(0~2 cm)土壤平均脱盐率比沙土(S)的值低6.01%;距滴头25 cm处的膜外壤土的盐分相对变化率比沙土的同类指标高64.80%;距滴头40 cm

处膜外壤土的积盐率比沙土的同类指标高303.00%。这是由于壤土的黏粒量及小孔隙数高于沙土,盐分更容易滞留其中所致^[21]。

2.2 蒸发强度对土壤盐分分布特征的影响

图3是不同蒸发强度处理下沙土和壤土的盐分分布情况。由图3可知,地膜的阻隔作用使蒸发主要对膜外土壤的盐分分布产生影响,导致膜外土壤积盐量随蒸发强度的增大而增大,而膜内土壤含盐量几乎不随蒸发强度的改变而变化。相同蒸发强度处理下,壤土的表层盐分聚集量比沙土的高。

由于覆膜阻隔蒸发的作用使膜内水汽微循环所产生的水汽聚集在膜下表面,凝结成小水滴后再次坠落到表土上,促进对膜内土壤的淋洗,因此,膜内(距滴头水平距离0 cm和10 cm)土壤的盐分分布基本不受蒸发强度的影响。在TFFS、TF处理下,沙土的膜内脱盐深度基本都达40 cm,平均脱盐率也相差不大,分别为-73.76%、-74.50%;而壤土的脱盐深度比沙土的值浅10 cm,平均脱盐率也分别比沙土的同类指标低12.15%、13.08%。

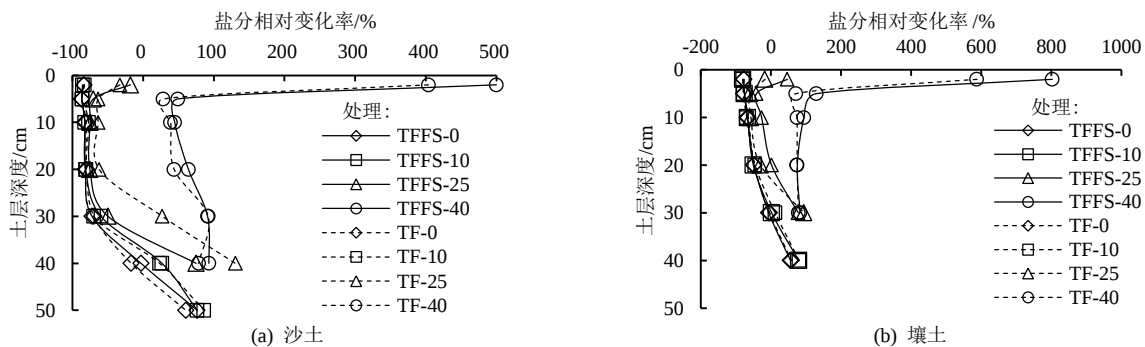


图3 不同蒸发强度处理下土壤盐分分布特征

Fig.3 Vertical salt distribution characteristics under different evaporation intensity

土壤剖面中含盐量是一定的,膜内土壤盐分在滴灌水分淋洗及膜内水汽微循环双重作用下一方面聚集在土壤下层,另一方面随水分侧向移动。由于TFFS处理比TF处理的表土温度高,使膜外表层土壤水分汽化强烈,蒸发量大。地表含水率的降低使土壤基质吸力增加,水分从土壤下层向上层运动,使盐分最终聚集在距滴头水平方向40 cm处的膜外表层(0~2 cm)土壤中。沙土表层含盐量在TFFS处理下为TF处理下的1.23倍;壤土的同类指标为1.36倍。

不同蒸发强度处理下,膜外2 cm以下的土层含盐量近似垂线分布,而表层(0~2 cm)土壤含盐量出现骤增,即膜外表层土壤聚集的盐分小部分来源于膜内土壤盐分随水分向膜外水平方向的推移过程,大部分是由于受膜外地表蒸发作用所致。TFFS处理下,沙土的表层(0~2 cm)含盐量是2 cm以下土层平均含盐量的7.3倍,壤土的该指标则为8.4倍;TF处理下,沙土的该指标为7.2倍,壤土的则为7.9倍。

2.3 表层含盐量与含水率之间的关系

图4是不同温度下沙土和壤土表层含盐量与含水率之间的关系图。由图4可知,水分蒸发带动土壤盐分向表土迁移,水分蒸发强度越大,表层含盐量越高。表土盐分累积量与土壤含水率呈负相关;温度越高,表层含盐量与含水率之间形成的曲线斜率的值越小。

结果表明,20、25、30、35、40、45℃温度处理下,沙土对应的曲线斜率分别为-3.50、-3.69、-3.84、-4.02、-4.15、-4.24;说明温度的升高对土壤表层的盐分形成有促进作用。由于温度升高会降低液体的黏滞性,使土壤水分蒸发通量及导水率增大,土壤水对溶质的溶解能力也增大,溶液的浓度也会相应提高;当存在于土壤中的盐分超过土壤水的溶解度时,盐分就会以晶体的形式出现在土壤表层,形成表聚特征。相反,温度降低会减缓表土蒸发通量对盐分的携带速率,在相同土壤含水率条件下,聚集于土壤表层的含盐量较少。

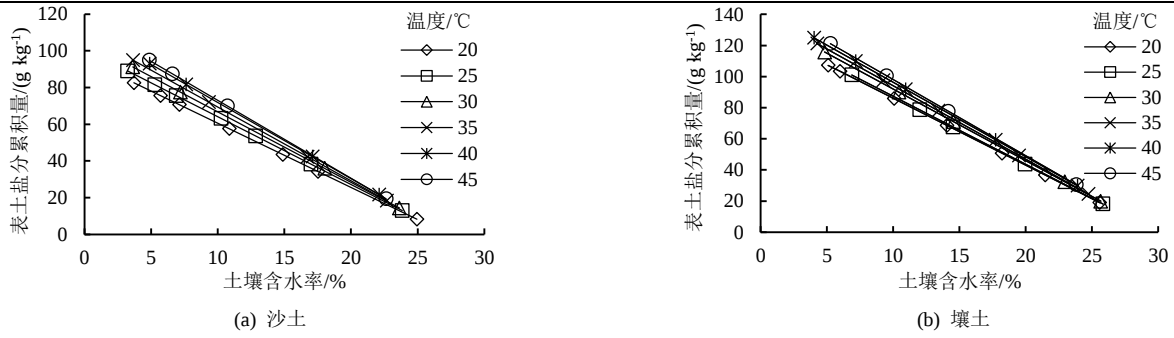


图4 不同温度下土壤表层含盐量与含水率之间的关系

Fig.4 The relationship between surface salt content and water content of soil under different temperature

土壤质地决定了土壤基质吸力及毛管水上升作用,也会影响土粒对盐分的吸附能力,导致不同质地土壤的盐分表聚程度不同。如图4所示,虽然壤土的表层含盐量与含水率之间的线性变化规律与沙土的类似,但在相同温度处理下,壤土形成的曲线斜率(绝对值)都比沙土的高。20、25、30、35、40、45 °C 温度处理下,壤土的曲线斜率(绝对值)分别比沙土的高 0.81、0.69、0.76、0.7、0.63、0.65;说明在相同蒸发强度处理下,壤土中的盐分更容易受水汽扩散影响而聚集在土壤表层。另外,以土壤表层含盐量为因变量,温度及土壤质量含水率为自变量,建立二元线性回归方程,结果如表3所示。

2种土质的土壤表层含盐量与温度正相关,与土壤含水率负相关;含水率 M 的增益系数绝对值要比温度 T 的增益系数绝对值高,说明土壤含水率对土壤表层含盐量的影响要大于温度对土壤表层含盐量的

影响。

表3 不同土质表聚含盐量与温度、含水率的二元回归方程

Table 3 Bivariate regression equation of surface salt content, temperature and water content of different soil texture

土质	回归方程	决定系数	置信区间	显著性
沙土	$S=91.162+0.453*T-3.846*M$	0.995	95%	<0.01
壤土	$S=124.924+0.414*T-4.590*M$	0.998	95%	<0.01

注 S 为土壤含盐量(g/kg); T 为温度($^{\circ}\text{C}$); M 为土壤质量含水率(%)。

2.4 不同土质土-气界面盐分离析速率

土壤盐分的表聚过程实际上是盐溶液由液态变为固态的过程,即盐分离析。图5是沙土和壤土在不同温度处理下盐分离析速率与含水率之间的关系。由图5可知,土壤表层盐分离析速率与含水率之间的关系存在峰值,而且峰值随着环境温度的升高而增大;含水率较低时,盐分离析速率最低。

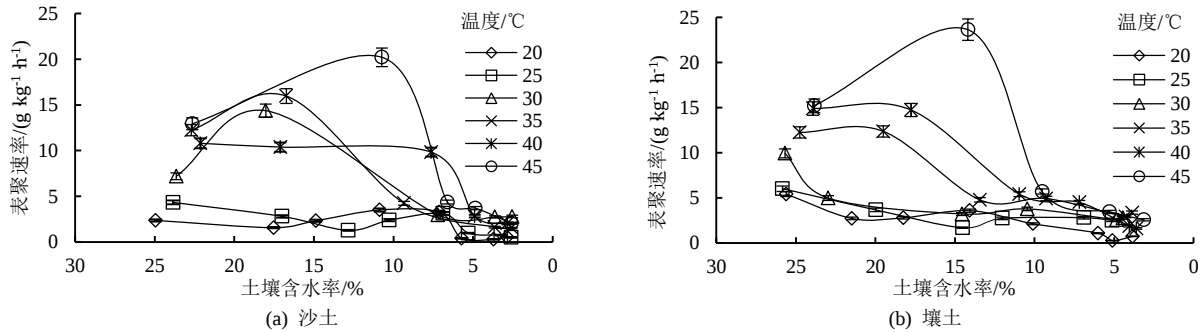


图5 土-气界面盐分离析速率

Fig.5 Salt segregation rate at soil and atmosphere interface

土壤盐分平均表聚速率随温度的升高逐渐加快。20、25、30、35、40、45 °C 处理下,沙土的盐分平均表聚速率分别是 1.74、2.02、6.01、7.13、7.17、8.67 ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)。壤土的盐分平均表聚速率分别是 2.35、3.24、4.55、6.78、7.18、10.19 ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)。

2种土质在高温处理时,土壤在低含水率条件下都表现出明显的低表聚速率特征。对于沙土而言,30、35、40、45 °C 处理下,土壤质量含水率低于5%左右时所对应的平均盐分表聚速率分别是 2.77、1.59、2.43、2.89 ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$);质量含水率高于5%左右时所对应的平均盐分表聚速率分别是 8.18、10.82、10.34、12.51

($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$);出现盐分表聚速率峰值时所对应的土壤质量含水率分别为 18.02%、16.73%、17.11%、10.73%。对于壤土而言,35、40、45 °C 处理下,土壤质量含水率在低于10%左右时所对应的平均盐分表聚速率分别是 3.75、2.67、3.91 ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$);土壤质量含水率在高于10%左右时所对应的平均盐分表聚速率分别是 9.81、11.70、14.85 ($\text{g kg}^{-1} \text{h}^{-1}$),出现盐分表聚速率峰值时所对应的土壤质量含水率分别为 19.51%、17.76%、14.18%。

另外,试验表明,在温度较低时,盐分离析速率受土质及土壤含水率的影响不大;但温度较高时,盐

分离析速率突变。沙土在 30 °C 时盐分聚集加速, 说明水分易汽化散失; 壤土在高于 35 °C 时盐分聚集才加速, 说明壤土中的水分受颗粒和毛管的吸附作用而不易汽化散失。

3 讨论

水汽扩散导致水分子逐渐脱离土体而蒸发散失, 一方面使土体表面基质吸力增大, 促进土壤中的液态水分带动盐分向蒸发面(土-气界面)迁移, 另一方面使到达土-气界面的盐溶液失去水分而逐渐形成固态结晶盐。土壤盐分迁移速度的快慢受土壤质地、溶液浓度及温度等综合因素的控制^[22-23], 从而对土壤表聚含盐量产生影响。

研究结果显示, 相同蒸发强度处理下, 壤土的表层含盐量明显高于沙土(图 3)。由 Penmann 公式可知^[24], 潜在蒸发强度与温度成正相关, 与风速也成正相关, 而且二者所产生的蒸发强度近似呈叠加状态。本试验中通风辐射处理的蒸发强度大于通风处理的蒸发强度。蒸发作用迫使土壤毛管水上升, 并携带盐分上升, 使盐分最终聚集在土壤表层。当蒸发强度增大时, 水分蒸发速度加快, 毛管水携带到地表的盐分也增多^[25]; 因此, 随着地表蒸发强度的增大, 膜外地表的积盐量增大。在蒸发强度一定的情况下, 土壤毛管孔径越小, 其毛管水上升的高度越大, 携带到地表的盐分也越多。壤土的毛管孔径小于沙土的值, 且壤土的毛管数量大于沙土的值^[26]。因此, 壤土的表层盐分含量比沙土高。另外, 相同处理下, 沙土湿润锋前缘出现明显的盐分聚集带, 而壤土的盐分分布区较为均匀(图 6)。这是由于沙土的颗粒表面吸附力小^[25], 在蒸发作用下水分汽化快, 当水分散失到剩余的分子数很小的时候, 沙土表面就会出现较为强烈的盐分聚集。而壤土颗粒的表面吸附力大, 在蒸发作用下水分汽化慢, 所以, 壤土的盐分表聚分布可能较为均匀。各温度处理下(20、25、30、35、40、45 °C), 测得沙土中的水分汽化速率分别为 1.19、1.68、2.67、3.38、5.08、5.56 mm/h, 壤土中水分的汽化速率分别比沙土低 5.46%、13.59%、14.89%、13.44%、42.86%、15.45%。



图 6 不同土质表土固态结晶盐形成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of surface soil crystal salt formation of different soil texture

表 3 显示, 土壤表层含盐量与温度正相关, 与土壤含水率负相关, 且土壤含水率对表层含盐量的影响大于温度对表层含盐量的影响。这是由于在土壤含盐量一定的情况下, 含水率决定了溶液浓度^[14], 而蒸发强度决定了水汽扩散速率^[27], 当水汽扩散速率所导致的最大蒸发力(水分汽化速率)小于土壤水分对盐分的溶解度时, 盐分仍然以溶解态存在于土壤溶液中; 只有当相应的最大蒸发力大于溶解度时, 才能够促使盐分在水汽散失作用下从盐溶液中离析出来。

盐分离析速率出现的峰值现象表明土壤水分有最小溶解度。当含水率较高时, 土壤盐分易被溶解, 也容易随着水分上升到土面; 但是表土的盐溶液浓度增大将导致溶质向下部浓度低处扩散, 影响了盐分离析速率。当土壤含水率低时, 表土溶解能力降低; 如果此时土壤水分对盐分的溶解能力仍大于该温度下的蒸发力(水分汽化速率), 水分仍然可以携带盐分运移^[28-30]; 上升到表层的盐分很快离析, 难以再向下部做分子扩散运动, 使离析速率提高。土壤含水率持续降低时, 整个土层的溶解能力下降, 盐分难以随水分上升到土面, 表土盐分离析速率降低。

另外, 盐分表聚过程除了对生产有负面作用以外, 在治理盐碱地的技术研发方面有一定的启发作用, 特别是在新疆干旱的盆地地区, 水利改良盐碱地存在难找排水出路的问题^[31], 因此, 区域“干排盐”或“干排水”技术受到重视^[32]。“干排盐”技术就是在有限区域内的低洼地点利用土壤水蒸发作用将盐分表聚在地表, 然后将其清除, 其相应的技术指标需要依据盐分表聚理论和影响因素来设计^[33-34]。因此, 对该问题进行深入研究很有必要。

本研究表明, 在盐分表聚的过程中, 土壤水分起着溶解、携带、脱离盐分的作用; 而环境温度及蒸发强度起着使水分由液态变为气态的作用, 同时温度也可使土壤水分对盐分的溶解度有所升高, 增加其携带盐分的能力。在土壤含盐量一定的情况下, 土壤含水率的增加可提高其对盐分的溶解度; 而在土壤含水率一定的情况下, 如果土壤含盐量不超过溶液的最大溶解度, 盐分可随水分迁移(淋洗)。在覆膜滴灌条件下, 膜内土壤中的水分无法蒸散, 且浅层土壤中的温度较高; 相对于膜间土壤, 膜内土壤水分可以溶解的盐分也较多, 从而间接提高了灌溉水对土壤盐分的淋洗效率。

4 结论

1) 覆膜滴灌条件下, 2 种土质的表层含盐量随距滴头水平距离呈指数函数分布; 膜外土壤垂直剖面上的含盐量呈“Γ”型分布, 盐分主要聚集在表层土

壤中。其中,高蒸发强度处理下,沙土表层(0~2 cm)的平均含盐量是2 cm以下土层平均含盐量的7.3倍,壤土表层(0~2 cm)的平均含盐量是2 cm以下土层平均含盐量的8.4倍,低蒸发强度处理下,沙土和壤土的对应数值分别是7.2倍和7.9倍。

2)影响土壤盐分表聚的主要因素是土壤水分的蒸发速率;土壤含水率、环境温度和蒸发强度的提高都可以增大土壤水分蒸发速率,导致土壤表面盐分聚集量增加,其中,土壤含水率所起的作用最大。

3)土壤蒸发过程中盐分表聚速率存在峰值,而且峰值与环境温度呈正相关。蒸发作用下,壤土的盐分表聚速率比沙土的盐分表聚速率高。

参考文献:

- [1] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理,2000(2): 177-181.
TIAN Changyan, ZHOU Hongfei, LIU Guoqing. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21's century in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2000(2): 177-181.
- [2] 王海江,石建初,张花玲,等. 不同改良措施下新疆重度盐碱土壤盐分变化与脱盐效果[J]. 农业工程学报,2014,30(22): 102-111.
WANG Haijiang, SHI Jianchu, ZHANG Hualing, et al. Soil salinity dynamic change and desalting effect under different improvement measures in severe salinity soil in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 102-111.
- [3] IMTIYAZ M, MGADLA N P, CHEPETE B, et al. Response of six vegetable crops to irrigation schedules[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 331-342.
- [4] 张勇康,刘淑慧,卢垟杰,等. 滴灌施肥对盐碱地土壤盐分运移及草木樨生长的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(3): 43-49.
ZHANG Yongkang, LIU Shuhui, LU Yangjie, et al. The growth of melilotus and salt leaching in salt-affected soil under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 43-49.
- [5] 王全九,王文焰,吕殿青,等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报,2000,16(4): 54-57.
WANG Quanjiu, WANG Wenyan, LYU Dianqing, et al. Water and salt transport features for salt-effected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 54-57.
- [6] 张伟,李鲁华,张建国,等. 准葛尔盆地南缘不同土壤质地棉田膜下滴灌盐分运移规律研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2): 52-56.
ZHANG Wei, LI Luhua, ZHANG Jianguo, et al. Salt transfer for plastic sheet covered cotton field using drip irrigation at different soil texture in the north edge of Dzungarian basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 52-56.
- [7] 周和平,王少丽,姚新华,等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究[J]. 水利学报,2013,44(11): 1380-1388.
ZHOU Heping, WANG Shaoli, YAO Xinhua, et al. Research on distribution characteristics and salt-discharging effect of directional migration of water and salt in soil through drip irrigation under plastic film[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1380-1388.
- [8] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5): 837-845.
YANG Jingsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.
- [9] 窦旭,史海滨,苗庆丰,等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(3): 246-253.
DOU Xu, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt and the influence of groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 246-253.
- [10] YAKIREVICH A, BERLINER P, SOREK S. A model for numerical simulating of evaporation from bare saline soil[J]. Water Resource Research, 1997, 33(5): 1021-1033.
- [11] GRUNBERGER O, MACAIGNE P, MICHELOT J L, et al. Salt crust development in paddy owing to soil evaporation and drainage: Contribution of chloride and deuterium profile analysis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(1): 110-123.
- [12] 李小刚,崔志军,王玲英,等. 盐化和有机质对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响[J]. 土壤学报,2002,39(4): 550-559.
LI Xiaogang, CUI Zhijun, WANG Lingying, et al. Effects of salinization and organic matter on soil structural stability and Atterberg limits[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 550-559.
- [13] FUJIMAKI H, SHIMANO T, INOUE M, et al. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil[J]. Vadose Zone Journal, 2006(5): 1246-1256.
- [14] 彭振阳,郭会,伍靖伟,等. 溶质势对地表蒸发速率的影响[J]. 水科学进展,2013,24(2): 235-242.
PENG Zhenyang, GUO Hui, WU Jingwei, et al. Contribution of osmotic potential on bare soil evaporation rate[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 235-242.
- [15] 赵莉,罗建新,黄海龙,等. 保护地土壤次生盐渍化的成因及防治措施[J]. 作物研究,2007,21(5): 547-554.
ZHAO Li, LUO Jianxin, HUANG Hailong, et al. The cause and control of soil secondary salinization in protected land[J]. Crop Research, 2007, 21(5): 547-554.
- [16] 刘东伟,吉力力·阿不都外力,雷加强,等. 盐尘暴及其生态效应[J]. 中国沙漠,2011,31(1): 168-173.
LIU Dongwei, JILILI Abuduwaali, LEI Jiaqiang, et al. Saline dust storm and its ecological effects[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 168-173.
- [17] 胡明芳,田长彦,赵振勇,等. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报,2012,40(10): 111-117.
HU Mingfang, TIAN Changyan, ZHAO Zhenyong, et al. Salinization causes and research progress of technologies improving saline-alkali soil in Xinjiang[J]. Journal of Northwest A&F University, 2012, 40(10): 111-117.
- [18] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社,2006.
SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] WARRICK A W. Soil Water Dynamics[M]. New York: Oxford University Press Inc., 2003.
- [20] HILLEL D. Introduction to Environmental Soil Physics[M]. Elsevier Science (USA), Academic Press, 2004.
- [21] 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.
- [22] GAO Z, FAN X, BIAN L. An analytical solution to one-dimensional thermal conduction- convection in soil[J]. Soil Science, 2003, 168(2): 99-107.
- [23] MARINO M A. Distribution of contaminant in porous media flow[J]. Water Resource Research, 1974, 10(5): 1013-1018.
- [24] 刘钰,PEREIRA L S, TEIXEIRA J L,等. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报,1997(6): 27-33.

- LIU Yu, PEREIRA L S, TEIXEIRA J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(6): 27-33.
- [25] 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 温度势梯度下土壤水平一维水盐运动特征的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 4-8.
- LI Yi, WANG Wenyan, WANG Qianjiu, et al. One-Dimensional water and salt transport induced by temperature gradient[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 4-8.
- [26] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35(5): 537-540.
- XIE Wenyan, FAN Guisheng. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(5): 537-540.
- [27] 钱峰, 程冬兵, 刘静君. 土壤蒸发强度随土壤溶液盐分的变化研究[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(3): 50-53.
- QIAN Feng, CHENG Dongbing, LIU Jingjun. Variation of evaporation intensity with salinity in soil solution[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(3): 50-53.
- [28] 杨金忠. 饱和-非饱和土壤水盐运动的理论与实验研究[D]. 武汉: 武汉水利电力学院, 1986.
- YANG Jinzhong. Theoretical and experimental study of water and solute transport in saturated-unsaturated soil[D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1986.
- [29] 解建仓, 韩霁昌, 王涛, 等. 蓄水和蒸发条件下土壤过渡层中水盐运移规律研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(2): 239-244.
- XIE Jiancang, HAN Jichang, WANG Tao, et al. Experimental and numerical simulation on salt movement in the transition layer of soil under ponding and evaporation conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(2): 239-244.
- [30] SUTERA S P, SKALAK R. The history of Poiseuille's law[J]. *Annual Review of fluid Mechanics*, 1993, 25(1): 1-19.
- [31] 范未华, 轩俊伟, 李保国, 等. 长期滴灌棉田表层土壤盐分时空变化特征[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 83-89.
- FAN Weihua, XUAN Junwei, LI Baoguo, et al. The impact of long-term drip irrigation on spatiotemporal variation in salt in the proximity of soil surface in a cotton field[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 83-89.
- [32] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 暗管排水控盐对盐渍化灌区土壤盐分淋洗有效性评价[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 102-110.
- DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Assessing the efficiency of subsurface drain in controlling soil salinization in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 102-110.
- [33] KONUKCU F, GOWING J W, Rose D A. Dry drainage: A sustainable solution to waterlogging and salinity problems in irrigation areas?[J]. *Agriculture Water Management*, 2006, 83: 1-12.
- [34] 王茨, 郭航, 李娟, 等. “改排为蓄”和“覆沙改良”整治前后盐碱地微观结构研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(Supp.1): 75-78.
- WANG Ying, GUO Hang, LI Juan, et al. Influence of different soil organic reconstruction methods on microstructure of saline-alkali soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(Supp.1): 75-78.

Salt Accumulation and Distribution under Mulched Drip Irrigation

CHEN Wenjuan¹, LI Mingsi^{2*}, LI Qinglin², LI Dongwei²

(1. College of Sciences, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: 【Background and objective】 Mulched drip irrigation can push salt out of the root zone to sustain crop growth, but evaporation from soil outside the mulching film drives the salt to redistribute. Understanding salt accumulation and redistribution under mulched drip irrigation is important to alleviate soil salinization. Taking Xinjiang as an example, the objective of this paper is to experimentally study salt accumulation and redistribution in soil under mulched drip irrigation. 【Method】 The experiment was conducted in a laboratory using repacked sandy soil and loamy soil. For each soil, we compared high evaporation and low evaporation both adjusted by temperature. Salt distribution in the horizontal and vertical directions was measured in each treatment. 【Result】 Regardless of soil type, salt content in the soil surface decreases exponentially along the distance away from the emitter. In the vertical direction, salt content in the soil outside the mulching film is distributed in a “T” type, and the salt mainly accumulates in the soil proximal to the surface. Under high evaporation, the average salt content in the surface (0~2 cm) of the sandy soil is 7.3 times that in the subsoil below the depth of 2 cm, while the average salt content in the surface (0~2 cm) of the loamy soil is 8.4 times that in the subsoil below the depth of 2 cm. At low evaporation, the associated salt content in the surface of the sandy and loamy soils is 7.2 times and 7.9 times, respectively, that in the subsoils. Soil evaporation is the main determinant of salt accumulation in the soil surface. Increasing soil moisture content, temperature or evaporation enhances evaporation, leading to an increase in salt accumulation in the soil surface. Because salt solubility drops when soil water content decreases, there is a peak in salt accumulation rate during the evaporation process, which is positively correlated with temperature. 【Conclusion】 The evaporation of soil water leads to salt precipitation around the soil surface. Salt accumulation at the loamy soil surface is higher than that at the sandy soil surface. These results can help design mulched drip irrigation for crops in salt-affected soils.

Key words: mulched drip irrigation; soil texture; salt accumulation; accumulate rate

责任编辑: 赵宇龙