doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.029

滴灌条件下排水暗管间距对土壤盐分淋洗的影响

王振华[1,2]　衡　通[1,2]　李文昊[1,2]　张金珠[1,2]　杨彬林[1]　姜昱杉[1]
(1.石河子大学水利建筑工程学院,石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,石河子 832000)

摘要:在滴灌淋洗条件下设计暗管排水试验,研究暗管不同埋设间距(15、20、25 m)对土壤剖面盐分分布及脱盐淋洗效果的影响。结果表明:滴灌淋洗期间,0~70 cm 土层含盐量显著降低,与 CK 相比,试验地不同地段土壤平均含盐量减少 10 g/kg 以上。从暗管上方至相邻暗管中点位置处不同剖面土壤平均脱盐率逐渐减小,15、20、25 m 间距小区在 0~100 cm 埋深土壤中点位置处最大脱盐率分别为 84.01%、77.75%、73.98%,土壤整体脱盐率介于 51.82%~60.43%之间。吸水管埋管间距越小,小区暗管排水阶段排水流量越大,排水矿化度、电导率也越大,但成本会略高。15 m 间距相比 20、25 m 间距小区每公顷多投入的成本和平均脱盐率差值分别为 8 430、12 570 元和 4.78%、8.61%;15 m 间距暗管处理在水平距离暗管 0、5、7.5 m 处土壤脱盐率最大值分别为 86.47%、85.15%、84.01%,且排水期间排水流量、矿化度、电导率最大,分别为 2 m^3/h、189.15 g/L 和 35.9 mS/cm;土壤盐分淋洗效果优于 20、25 m 间距小区,淋洗相同盐分含量土壤所需灌水量也低于 20、25 m 间距;2 次灌水后 0~70 cm 土层盐分整体已降至 10 g/kg 以下,作物生长条件大为改善,适宜作为指导新疆盐渍土改良滴管条件下暗管间距布设参数的依据。

关键词:盐碱土;滴灌;暗管排水;脱盐率;淋洗
中图分类号:S278　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)08-0253-09

Effects of Drainage Pipe Spacing on Soil Salinity Leaching under Drip Irrigation Condition

WANG Zhenhua[1,2]　HENG Tong[1,2]　LI Wenhao[1,2]　ZHANG Jinzhu[1,2]　YANG Binlin[1]　JIANG Yushan[1]
(1. *College of Water and Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*
2. *Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Group*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: In order to explore the water saving and efficient alkali-saline land pattern, the underground pipe drainage experiment was designed under the condition of drip irrigation to seek the effects of different buried spacings in the width of 15 m, 20 m and 25 m on salt distribution in soil profile and the desalination and leaching. The results showed that soil salinity in 0~70 cm soil layer was decreased significantly during the drip irrigation, and compared with CK the average salinity of soils was decreased by more than 10 g/kg. Different spacing widths of 15 m, 20 m and 25 m below 100 cm soil layer indicated different maximum soil desalination rates, which were 86.47%, 84.79% and 81.35%, respectively, and the total desalination rate of soil was between 51.82% and 60.43%. The smaller the spacing of the buried pipe was, the larger the drainage flow in the drainage and drainage salinity and conductivity were, and thus the cost would be slightly higher. However, compared with 20 m and 25 m, the actual investment was increase by 8 430 yuan/hm^2 and 12 570 yuan/hm^2 in the spacing of 15 m and the overall soil desalination rate was increased by 1%. When 15 m spacing drainage pipes in the horizontal distances of 0 m, 5 m and 7.5 m, the maximum soil desalting rate was 86.47%, 85.15% and 84.01%, respectively, and drainage flow, salinity and conductivity during drainage were 2 m^3/h, 189.15 g/L and 35.9 mS/cm, respectively. Besides, soil salinity leaching curve fitting effect was better than 20 m and 25 m spacing area, and overall level of soil layer below 70 cm was fallen to below 10 g/kg and crop growth conditions were greatly improved, which was suitable as a parameter for the layout of the underground pipe drainage pipe of Xinjiang saline soil. These results revealed that the drip evolution mode had great

收稿日期:2017-03-16　修回日期:2017-06-03
基金项目:"十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD20B03-3)和国家自然科学基金项目(41361071)
作者简介:王振华(1979—),男,教授,博士,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究,E-mail:wzh2002027@163.com

importance for the underground pipe drainage salinity, laied the foundation for the following long-term research, ultimately achieved improvement goals, and met the conditions for the growth of the crops.
Key words: saline soils; drip irrigation; underground pipe drainage; desalination rate; leaching

引言

新疆是以农田灌溉为主导的农业经济发展体系,水资源严重匮乏,全疆农业用水仅为全国平均值的 74.16%[1],土壤盐渍化问题日益突出[2],盐碱荒地面积达 2.81×10^7 hm^2[3],占中国盐碱地总面积的 1/3。水资源短缺和土壤盐碱化已成为威胁新疆农业经济和绿洲生态环境的重要因素[4-5],严重制约新疆经济的发展。节水控盐技术对盐碱地抗性较强,对农业具有节水、增产作用,一定程度上可以抑制浅层根区盐分的累积,从膜下滴灌技术推广至今,应用面积已突破 2×10^6 hm^2[6]。膜下滴灌只是调节作物根系层的盐分,无法从本质上将其排出土体,长期滴灌使土壤盐分向湿润峰边缘处集中,耕层区土壤年均积盐量达到 0.36 g/kg,盐分在田间土层的不断积累[7-9]可能导致土壤积盐爆发[10-11],因此,有必要探索膜下滴灌条件下改良盐碱地的模式或方法。

盐碱地改良的方法主要包括水利改良(工程排水)、农业改良(耕作和施肥)、化学改良(各类改良剂)、生物改良(耐盐作物)等措施,运用淡水冲洗配合暗管排水排盐是最直接、最快捷、应用范围最广的改良方式之一[12],在世界各国盐碱地改良过程中暗管排水发挥了极其重要的作用[13]。其研究重点为暗管布设参数[14]以及暗管排水后的水盐平衡[15-17]问题,但土壤次生盐渍化严重,通常每隔几年就必须进行地面漫灌冲洗。KLADIVKO 等[18]研究不同间距对硝态氮浓度、排水流量的影响,从而为改良土壤盐渍制定适当的管理策略。BAHCECI 等[19]研究发现干旱区盐渍化农田铺设暗管排水系统 3 年后,表层土壤平均脱盐率高达 80%。RITZEMA 等[20]通过农业气候、土壤性质等条件确定暗管设计参数,认为暗管排水系统是一种高度有效解决涝渍、盐碱化危害问题的方式,且成本回报率高,可以保障农业灌溉资本投资的可持续性。我国自 20 世纪 80 年代引进暗管排水以来取得了显著的效果[21-22],一些学者研究了暗管排水措施对盐渍土淋洗改良的影响。张万钧等[23]在天津滨海新区对暗管排盐的技术参数进行了系统研究,提出了不同暗管间距对土壤淋洗脱盐效果的影响,为暗管排盐技术的推广起到重要推动作用[24]。李显溦等[25]通过软件模拟和小区试验对设计排水暗管试验进行了校验,为长期规划暗管排盐策略提供了科学可靠的理论依据。

研究表明,暗管排水[26-27]可以有效降低农田地下水埋深[28]、治理涝渍灾害[29]、排除盐分,对提高作物产量都具有显著效果[30],但这些研究仅反映了各种暗管排水措施对土壤改良的整体效果,不能直接看出不同地块改良的效果。漫灌时控制区土壤与暗管水平距离越小,水力梯度越大,水分入渗强度越大,反之则越小[31-32];漫灌灌水时间较短,导致地下水上升加剧并产生土壤次生盐渍化危害,本质上无法将盐分从土壤内部排出,需对其排盐效率进行改进。本文在滴灌条件下,设计田间暗管排水排盐试验,研究暗管不同间距对土壤空间盐分分布的影响,以及在不同埋深位置处的脱盐淋洗效果,以期为干旱区土壤盐碱地改良和弃耕地恢复重建提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于沙湾县安集海乡北端,属于新疆生产建设兵团 141 团,地处 85°21′E、44°36′N。总规划面积 3.4 hm^2,地势南高北低,南北自然坡降 0.24%。气候特征为温带大陆性气候,是典型的大陆性干旱荒漠气候,年平均气温 6.8℃,降水少(年降水量 182 mm),蒸发大(年蒸发量 1 717.9 mm)。本试验选取地块为常年绝收的弃耕土地,地下水埋藏较深(大于 4 m),浅层土壤含盐量已达盐土水平(大于 20 g/kg),土壤 pH 值为 8.51,田间持水率为 14.39% ~27.58%。土壤类型及物理指标见表 1。

1.2 试验设计

试验区包括 4 个小区(含未铺管对照 CK),分别铺设间距 15、20、25 m 的吸水管,暗管统一埋深 0.7 m、长度 140 m,共 8 条暗管(图 1)。吸水管材质为带孔 PVC 单臂波纹管,管径 90 mm,开孔缝隙小于等于 1 mm,开孔面积大于 250 cm^2/m^2,设计坡降 0.4%。排水管为 PVC 硬塑料管,管径 250 mm,设计坡降 0.3%。

2016 年 3 月初在试验区进行暗管施工,4 月末结束。施工前,试验地周围打田埂,按平面布置测量放线。用轻型挖掘机根据设计深度开挖管沟,每开挖 20 m 检查沟深与纵坡。随后铲平沟底,沿坡降方向铺设包裹无纺布的吸水管,管周围填粒径小于等于 4 cm 的砂砾石,厚约 20 cm,最后分层回填埋管。

表 1　暗管试验区土壤类型及物理参数

Tab. 1　Soil type and physical parameter of pipe test area

土层深度/cm	土壤粒径质量分数/%			结构类型	容重/(g·cm^{-3})	比重/(g·cm^{-3})	饱和含水率/%	渗透系数/(cm·d^{-1})	总孔隙度/%
	砂粒	粉粒	粘粒						
0 ~ 5	61.8	35.1	3.1	砂质壤土	1.18	1.48	20.17	12.1	54.99
15 ~ 20	63.3	34.1	2.6	砂质壤土	1.16	1.57	21.27	9.6	55.53
35 ~ 40	51.6	44.1	4.3	壤土	1.25	1.47	16.75	8.6	52.62
55 ~ 60	52.7	44.8	2.5	壤土	1.20	1.38	19.03	8.1	54.33
75 ~ 80	53.1	43.9	3.0	壤土	1.17	1.72	19.70	8.5	55.19
95 ~ 100	53.1	44.7	2.2	壤土	1.17	1.81	25.54	8.4	55.45
115 ~ 120	45.8	52.2	2.0	粉砂质壤土	1.22	1.69	18.02	7.1	53.57
135 ~ 140	41.4	52.1	6.5	粉砂质壤土	1.29	1.76	22.41	6.9	51.38

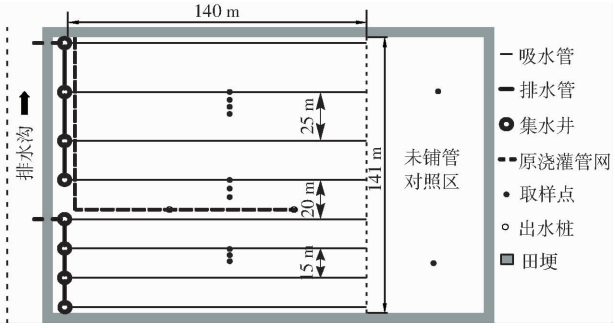

图 1　暗管排水田间试验平面图

Fig. 1　Plan of field experiment design of pipe

吸水管末端各设置一集水井，选用优质树脂一体式集水井，并由排水管连接，汇入排水沟。除紧靠滤料 30 cm 的土料不需夯实外，其他均要分层夯实，除挖掘机施工外，其余工序均有人工作业完成。

试验地采用滴灌淋洗的方式，淋洗前 60 d 试验地进行了深翻晒地。于 6 月初铺设滴灌带并播种油葵：采用“一管两行”模式播种，供试油葵品种为 KF366，株距 10 cm，行距 30 cm，6 月 8 日播种，6 月 15 日出苗，9 月 7 日收获前试验地再次进行深翻犁地，油葵作育肥处理；滴灌毛管间距为 90 cm，滴灌带单孔出流量 2.6 L/h，滴头间距 30 cm，一定时间后局部形成 0 ~ 2 cm 地表积水，灌溉水源为地表水（矿化度在 0.8 g/L）；油葵生育期前后共进行了 2 次滴灌淋洗，第 1 次淋洗日期 6 月 8 日，第 2 次淋洗日期 9 月 8 日，持续淋洗水量分别为 1 150、1 227 mm；一次灌水共持续 108 h，其中 0 ~ 60 h 为供水阶段，灌水量为 1 150 mm，22 ~ 108 h 为排水阶段（水盐重分布阶段，第 22 小时为首次排水时间）；第 2 次灌水从 2016 年 9 月 9 日开始，共持续 110 h，供水时长 64 h，灌水量为 1 227 mm，暗管排水时长为 68 h。

1.3　数据的测定与处理

1.3.1　土样处理

为得到试验地整体排盐情况，选定 3 个小区中间的吸水管，分别在 15 m 间距小区与暗管水平距离 0、5、7.5 m 处，20 m 间距小区与暗管水平距离 0、5、10 m 处，25 m 间距小区与暗管水平距离 0、5、10、12.5 m 处以及未铺设暗管对照区设置观测点。土样分 4 次进行，取土日期分别是 2016 年 6 月 8 日、6 月 17 日、9 月 8 日、9 月 20 日。每次分层取 0 ~ 3 cm、3 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm、100 ~ 120 cm、120 ~ 140 cm、140 ~ 160 cm、160 ~ 180 cm、180 ~ 200 cm 共计 11 层土样。

称取 10 g 土样经风干、粉碎、过 1 mm 筛后放入三角瓶中，加入 50 mL 蒸馏水，使用振荡机振荡三角瓶 10 min，静置 15 min 后进行过滤，得到土水质量比 1∶5的浸提液，通过 DDS－307 型电导率仪测定浸提液电导率（EC）。用干燥残渣法标定含盐量与电导率之间的关系为

$$y = 2.277E_C - 0.324 \quad (R^2 = 0.98) \tag{1}$$

式中　y——土壤含盐量，g/kg

E_C——电导率，mS/cm

土壤脱盐率的计算式为

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中　N——脱盐率，%

S_1——土壤盐分初始值，g/kg

S_2——灌水后土壤盐分终值，g/kg

土壤渗透系数用 Guelph1800K 型入渗仪测定；田间持水率采用室内测定法[33]；土壤容重采用环刀取原状土测定；土壤粒径分布采用 LSI3320 型激光粒度仪测定。其他指标采用常规分析方法[34]。

1.3.2　水样处理

监测暗管排水流量并分别测定电导率、矿化度，监测时间从吸水管排水阶段开始，每隔 6 h 测定一次。集水井内空间狭小，为精确测量排水流量，利用取井水的原理：先用水槽在井下接水，计时器记时 10 s，提上井以后倒入量筒，待水样静止后记录量筒容量，重复 4 次，水槽容量为 10 L，量筒规格分别为 500、1 000、2 000 mL，最终排水流量为

$$Q = 0.36V_1 \tag{3}$$

式中 Q——排水流量,g/kg

V_1——10 s 内水槽中水样体积,mL

蒸发皿洗净并置于((180 ± 3)℃)干燥箱中干燥 2 h,放入干燥器中冷却至室温(20℃)后称量,直至质量恒定(2 次称量相差不超过 0.000 5 g)。取适量水样用玻璃砂芯坩埚抽滤,用 DDS - 307 型电导率仪测定浸提液电导率(EC),并用移液器取过滤后水样 20 mL 于蒸发皿中。将蒸发皿在((180 ± 3)℃)干燥至质量恒定并称量。最终矿化度计算式为

$$\rho = \frac{1\,000(m_1 - m_0)}{V_2} \tag{4}$$

式中 ρ——水样矿化度的质量浓度,g/L

V_2——水样体积,mL

m_0——蒸发皿的质量,g

m_1——干燥后蒸发皿和矿化物的质量,g

用 Excel、SPSS 19.0 进行数据处理,OriginPro 完成制图。

2 结果与分析

2.1 不同暗管间距对土壤盐分的影响

滴灌条件下土壤盐分随土壤水流动发生定向迁移[35]。图 2 为暗管不同间距土壤盐分剖面分布图,可以反映 2 次灌水土壤盐分具体水平、垂直方向迁移特征及过程:第 1 次灌水前,土壤长期处于积盐状态,表层含盐量较高,均大于 20 g/kg,达到盐土水平,在 0 ~ 40 cm 土层盐分相对集中,含盐量自上而下逐渐降低。首次灌水后,不同间距小区浅层土壤含盐量出现不同程度降低,在滴灌水动力驱动下,浅层盐分向下层迁移,0 ~ 60 cm 土层盐分出现不同程度降低。第 2 次灌水后,0 ~ 70 cm 盐分总体降低,基本降至中度盐化水平(6 ~ 10 g/kg),与 CK 相比,试验地不同地段 0 ~ 70 cm 土层含盐量平均减少 10 g/kg 以上。其中 15 m 间距小区含盐量降幅最大,0 ~ 70 cm 土层含盐量由第 1 次灌水前的(6 月 8 日)22.96 g/kg 降至 5.75 g/kg,达到轻度盐化水平,

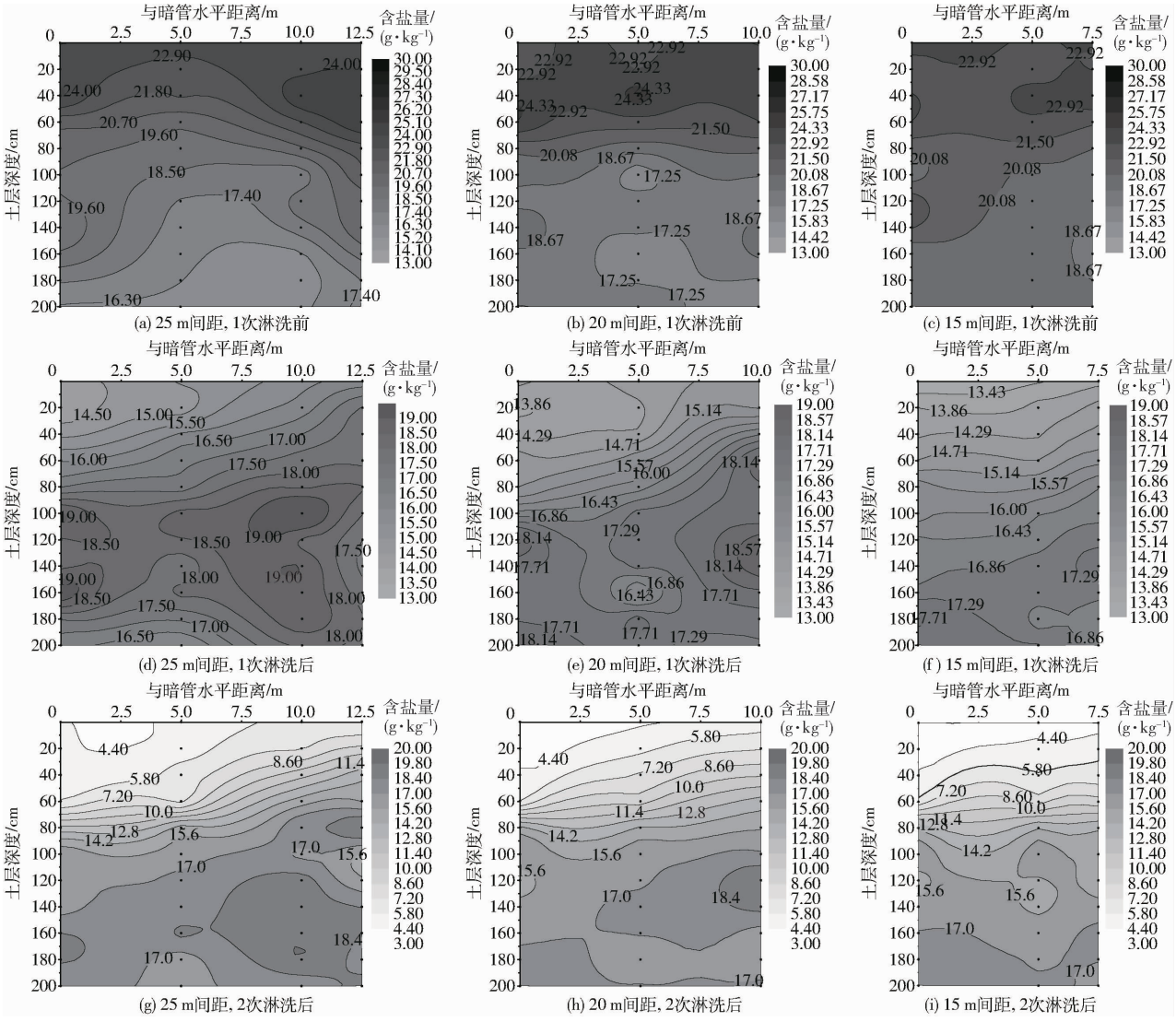

图 2 暗管不同间距土壤盐分剖面分布

Fig. 2 Profile distributions of soil salinity under different buried depths of pipe

70 cm 以下土层含盐量变化不显著，随土层深度的增加土壤脱盐效果明显降低。各间距小区从吸水管上方至不同水平距离处田间各点土壤含盐量变化特征明显不同，以第 2 次滴灌淋洗后土壤盐分变化为例，25 m 间距小区距吸水管 0、5、10、12.5 m 处土壤盐分变化差异明显，特别是 0 ~ 60 cm 土层土壤，距吸水管 0 ~ 7.5 m 处土壤含盐量从 4.97 g/kg 增加至 11.06 g/kg，20 m 间距小区距吸水管 0、5、10 m 处土壤盐分变化差异也很明显，距吸水管 0 m 处土壤含盐量明显低于其他 2 处，随水平距离的增加，浅层土壤盐分均呈现逐渐增加的趋势。15 m 间距小区与吸水管相距 0、5、7.5 m 处在 0 ~ 70 cm 土层含盐量降低较明显，整体在 10 g/kg 以下。经过 2 次灌水，暗管对深层（70 cm 以下）土壤排盐效果不显著；由于地下水位较深（大于 4 m），所以其对土壤盐分影响较小；在 0 ~ 70 cm 土壤中，不同间距小区土壤盐分降低值从小到大顺序为：CK、25 m、20 m、15 m；吸水管水平距离越近，每次淋洗土壤盐分降低越明显；吸水管间距越大，每次淋洗土壤含盐量差异越大。

2.2　不同暗管间距对土壤脱盐效果的影响

表 2 为 2 次淋洗结束后各间距吸水管土壤含盐量与脱盐率的分析结果。由于深层土壤受暗管排水影响不明显，且变化差异较小，本文仅对 0 ~ 100 cm 深土体土壤含盐量与脱盐率进行分析。2 次灌水后，对照区（CK）未铺设暗管及滴灌带，各土层（0 ~ 100 cm）含盐量仍处于较大值，其中 0 ~ 60 cm 土层含盐量均在 20 g/kg 以上，60 ~ 100 cm 土层含盐量略低于 0 ~ 60 cm 以上土层，脱盐率均为负值，呈现积盐趋势。相对于铺管区（15、20、25 m 间距小区），经过 2 次滴灌淋洗，土壤脱盐率在土体中自上而下逐渐降低，15、20、25 m 间距小区在距离暗管不同剖面土壤最大脱盐率分别为 86.47%、84.79%、81.35%。各间距小区在水平距离 0 m 处土壤脱盐率最大，中点位置处土壤脱盐率最小，15、20、25 m 间距小区在中点位置处的最大脱盐率分别为 84.01%、77.75%、73.98%。各间距排水暗管在 0 ~ 20 cm 土层平均脱盐率均达到最大值，分别为 85.23%、80.39%、76.92%。在 0 ~ 100 cm 土体中，不同间距排水暗管在距离暗管不同剖面土壤平均脱盐率差异较小。15、20、25 m 间距小区在 0 ~ 100 cm 土体中各剖面土壤平均脱盐率分别为 60.43%、55.65%、51.82%，从水平、垂直方向来看，呈现的趋势由大到小依次为：15 m、20 m、25 m、CK。这表明土壤脱盐率随土壤间距的减小而变大，与暗管水平距离越近，脱盐率越高，排水暗管间距对不同剖面土壤脱盐效果影响较大。

表 2　暗管不同间距土壤含盐量与脱盐率

Tab.2　Soil salinity and desalting rate under different pipe spacings

暗管间距/m	与暗管水平距离/m	0 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm		40 ~ 60 cm		60 ~ 100 cm		平均脱盐率/%（水平各点及各间距平均脱盐率）
		含盐量/（g·kg⁻¹）	脱盐率/%	含盐量/（g·kg⁻¹）	脱盐率/%	含盐量/（g·kg⁻¹）	脱盐率/%	含盐量/（g·kg⁻¹）	脱盐率/%	
15	0	3.24	86.47	3.85	82.53	4.74	79.41	12.27	41.47	63.11
	5	3.38	85.16	5.16	76.11	5.94	75.17	12.89	38.66	59.53
	7.5	3.69	84.01	5.46	76.13	6.40	73.18	12.88	36.84	58.63
	平均值		85.21		78.24		75.88		39.01	60.43
20	0	4.10	81.99	3.41	84.79	4.71	80.30	12.35	42.12	62.98
	5	4.22	81.44	5.44	76.25	7.37	70.34	13.40	30.84	55.51
	10	5.09	77.75	7.11	69.83	9.81	57.72	15.33	25.91	48.37
	平均值		80.39		76.84		69.58		33.10	55.65
25	0	4.49	81.35	4.58	80.28	4.87	79.81	11.48	43.42	63.43
	5	4.87	79.60	4.75	78.53	6.72	69.30	12.57	34.24	56.84
	10	6.50	72.58	7.05	70.25	10.94	55.74	16.59	18.93	44.38
	12.5	6.02	73.98	8.98	62.68	13.72	43.96	16.91	26.35	43.48
	平均值		76.92		72.46		61.93		30.52	51.82
CK		22.76	-2.37	22.91	-1.78	24.84	-0.32	19.37	-0.79	

表 3 为暗管施工试验综合工程成本明细，工程总造价 77 089 元，其中 15、20、25 m 间距小区每公顷投入成本分别为 30 202、22 126、24 761 元。由上文分析得出，各小区土壤平均脱盐率为 60.43%、55.65%、51.82%，根据数据可知：15 m 间距相比 20、25 m 间距小区每公顷多投入的成本和平均脱盐率差值分别为 8 430、12 570 元和 4.78%、8.61%，同理 20、25 m 间距相比 15 m 间距小区平均每公顷多投入 1 770、1 455 元，土壤整体脱盐率上升 1%。这些试验数据以及工程成本费用结果表明，间距越小

脱盐效果越好,成本相对会高,但从距离暗管不同剖面、不同土层深度排盐效果、实际排水情况来看,15 m 间距实际工程应用效果优于 20、25 m 间距排水暗管。

表 3 暗管施工试验综合工程成本明细

Tab. 3 Cost analysis of construction project of underground pipe

定额编号	费用名称	工程量	金额/元 概算定额基价	合计
1	挖沟槽土方/m^3	1 176	6	7 056
2	回填土方/m^3	1 176	4	4 704
3	集水井砖筑/m^3	10	100	1 000
4	沟底人工平整/m^2	1 120	0.2	224
5	土地机械平整/工时	1	500	500
6	砂砾石垫层/m^3	224	50	11 200
7	加工 Φ90 波纹管/m	1 000	10	10 000
8	加工集水井用玻璃钢管/根	16	1 000	16 000
9	树脂加筋一体式集水井/座	10	800	8 000
10	Φ90 波纹管 + 无纺布/m	1 120	4.6	1 232
11	Φ 250 U - PVC 管/m	150	80	1 200
12	滴灌带/m	21 980	0.3	6 594
13	主管道/m	423	0.9	381
14	滴灌水费 + 电费/元			3 000
15	人工管理费/元			4 000
16	运输费/元			2 000
工程造价总计			77 089	
15 m 间距造价总计/(元·hm^{-2})		0.63	47 940	30 202
20 m 间距造价总计/(元·hm^{-2})		0.56	39 510	22 126
25 m 间距造价总计/(元·hm^{-2})		0.70	35 370	24 761

注:工程费用计价以本地实际价格为准。

2.3 暗管淋洗期间排水特征

图 3 为暗管第 1 次淋洗期间不同间距小区排水流量动态变化,从暗管进入排水阶段(首次排水)开始,至最后一条吸水管停止排水共历时 90 h。各小区初始排水阶段流量均呈现爆发式增长,经历一段时间后达到相对稳定的状态,此时是排水流量的高峰,之后随排水时间的推移流量逐渐减小,最终停止排水。15、20、25 m 间距小区分别持续排水 76、78、84 h, 25 m 间距排水时间较长,15 m 间距小区分别比 20、25 m 间距暗管提前排水 4、6 h;15 m 间距排水流量最大,达到 2 m^3/h,经历 36 h;20 m 和 25 m 间距排水暗管流量差距不明显,分别经历 26、24 h,吸水管间距越小,排水阶段流量越大。

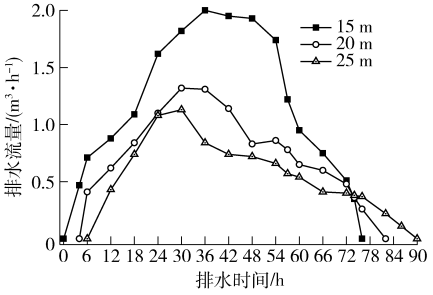

图 3 滴灌淋洗时暗管不同间距小区排水流量动态

Fig. 3 Dynamics of district drainage discharge under different pipe spacings

图 4 为暗管第 1 次淋洗期间不同间距小区矿化度、电导率动态变化曲线,矿化度表示水中所含无机矿物质成分的总量(或总含盐量),电导率能反映水中离子含量,它们之间存在一定的相关关系,实际电导率较大,不能直接用来描述矿化度,本文着重分析不同小区排水矿化度和电导率的动态变化。排水阶段 3 个小区排水矿化度较高,其中 15 m 间距暗管排水阶段矿化度均处于 150 g/L 左右,排水 12 h 后达到峰值 189.15 g/L,随后逐渐降低,但整体矿化度均高于 20、25 m 间距小区。20 m 间距暗管排水阶段整体矿化度处于 115 g/L 左右,25 m 间距所处地势较低,在滴灌水流作用下,排水 36 h 后矿化度出现上升,达到 109.37 g/L。排水阶段电导率相比矿化度在不同间距小区差异更加明显,总体均呈现降低趋势,且初值最高;15 m 间距吸水管电导率较高,介于 33.1 ~ 35.9 mS/cm 之间,且整体大于 20、25 m 间距电导率,但 20、25 m 间距小区的电导率分别在 28.8、25.1 mS/cm 以上。滴灌淋洗期间各小区暗管排水系统排水流量、矿化度和电导率变化特征表明,在暗管排水阶段,吸水管间距越小,暗管排水系统脱盐淋

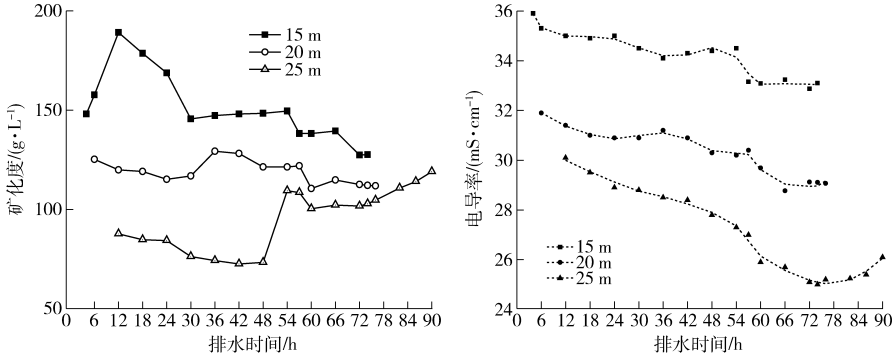

图 4 滴灌淋洗期间暗管不同间距矿化度、电导率动态

Fig. 4 Dynamics of salinity and conductivity under different pipe spacings during drip irrigation leaching

洗效率越高，土壤改良效率也越高。

2.4 盐分淋洗曲线

盐分特征曲线是由灌溉淋洗前后一定深度土壤盐分与淋洗定额为变量构建的方程，能反映土壤脱盐规律和淋洗效果，根据淋洗曲线可以规划特定的改良方案。淋洗曲线方程[35]为

$$\frac{W_e - W_{ep}}{W_{eo} - W_{ep}} = a\left(\frac{D_w}{D_s}\right)^b \tag{5}$$

式中　W_{eo}——淋洗前一定深度的土壤含盐量，g/kg

W_e——淋洗后一定深度的土壤含盐量，g/kg

W_{ep}——淋洗平衡土壤含盐量，g/kg

a、b——拟合参数

D_w——灌溉淋洗水量，mm

D_s——淋洗土层深度，cm

本试验分别取 0 ~ 20 cm、0 ~ 40 cm、0 ~ 60 cm、0 ~ 70 cm 土层深度；W_{ep}一般以淋洗结束后 0 ~ 5 cm 土层土壤含盐量表示；灌溉淋洗水量及土层深度取淋洗 1 150 mm 水量后表层 0 ~ 5 cm 的土壤含盐量，近似为 7.67 g/kg。

图 5 为暗管淋洗期间不同间距小区土壤盐分淋洗曲线，根据淋洗曲线可以看出，淋洗初期土壤盐分含量较高，滴灌淋洗脱盐效果也较好；淋洗后期随着土壤盐分的降低，淋洗效率明显降低，此时置换土壤中同等含量盐分需消耗更多淋洗水量。对 3 种间距小区进行比较，在淋洗相同盐分含量、相同土壤深度情况下，15 m 间距小区使用的水量要小于 20、25 m 间距小区淋洗的水量，其决定系数分别为 0.981、0.943、0.901，15 m 间距小区拟合效果良好，对大田滴灌淋洗的改良应用具有指导作用。

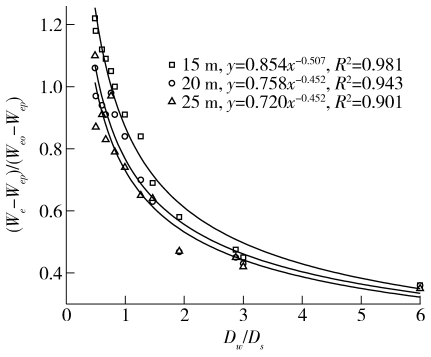

图 5　排水暗管不同间距土壤盐分淋洗曲线

Fig. 5　Salt-leaching curves under different pipe spacings

3　讨论

通过 2 次灌水，分析了暗管不同间距对滴灌条件下土壤盐分空间分布的影响、脱盐效果、工程经济效益及暗管淋排期间排水流量、矿化度和电导率动态变化特征，针对滴灌棉田地下水埋深较大这一特点，漫灌淋洗时暗管无法有效排出根系层中的土壤盐分，在原有浇灌系统上铺设排水暗管改良盐碱土，极大程度降低了土壤盐分，使浅层土壤含盐量降至 10 g/kg 以下中度盐化水平，已经达到改良荒地的阶段性目的。

许多学者已通过设计暗管不同间距或埋深得到土壤脱盐淋洗规律，总结出了适合研究区的灌排方案。张金龙等[36]研究暗管不同地段土壤经过 3 次淋洗后 0 ~ 1 m 深土体土壤脱盐率在 56.54% ~ 78.78% 之间，认为采用漫灌的方式对土壤进行改良浪费的水资源量较大。本试验经过 2 次淋洗，在 0 ~ 100 cm 土层土壤脱盐率介于 51.82% ~ 60.43% 之间，小于其研究结果。刘玉国等[37]等针对滴灌棉田，设计不同盐化地段上的暗管排水试验，研究发现土壤由表聚型向脱盐型转化，土壤表层盐分脱盐较快，中度盐化土壤脱盐率最高达到 90.89%，且电导率变化范围为 7.53 ~ 11.16 mS/cm，本试验结果脱盐率最大值达到 86.47%，浅层土壤经过 2 次淋洗含盐量均低于 10 g/kg，换算成电导率（式（1））为 4.53 mS/cm，均小于其研究结果。田玉福等[38]首先通过暗管排水技术及农业化学改良剂，针对松嫩平原苏打碱土设计了 4 种间距暗管，研究各间距土壤表层渗透性、有机质含量以及碱化度、钠离子吸附比等理化性状的影响，得到了最优暗管间距和埋深参数，促进了暗管改碱技术的发展及应用。根据最终土壤盐分变化和用水量之间的关系，拟合得出淋洗曲线方程，15 m 间距小区具有更高的淋洗效率，节水潜力及拟合结果较好，由此，淋洗曲线可用于指导大田滴灌淋洗条件下盐渍土改良应用。

综上所述，通过设计不同间距的排水暗管试验可以明显地反映研究区的土壤盐分特征，并通过脱盐淋洗效果得出最适宜的埋设方案。一般暗管排水[37-38]试验区域地下水位埋深小于等于 2 m，试验区地下水位较深，除灌水时期外其他月份均不排水。暗管改良效果受灌水量及灌水次数的影响，为避免田面积水应选择合理轮灌，本试验区总体盐分还处于中度盐化水平，后续应继续增加灌水次数，配合农艺、化学改良，防止土壤次生盐渍化，达到最终改良的目的。因此，通过滴灌淋洗条件下长期应用暗管排水技术的改良盐碱地是值得进一步研究的内容。

4　结论

（1）采用暗管排水技术配合滴灌淋洗下的农田，土壤盐分得到实质性改善，2 次灌水后，暗管排水阶段性改良效果明显。盐分在持续滴灌灌水作用下逐渐向下层运移，通过暗管排除土体，水平方向不

断向靠近暗管埋设的区域迁移,3 个间距小区相邻暗管中点位置处至暗管上方不同剖面土壤平均脱盐率逐渐增加。

(2)经历 2 次灌水,0 ~ 70 cm 土层含盐量整体在 10 g/kg 以下,70 cm 以下土层含盐量变化不显著。各小区脱盐率由大到小依次为:15 m、20 m、25 m、CK,土壤脱盐率受空间的影响较大,距离暗管越远,土壤脱盐率越小。3 个间距小区 0 ~ 100 cm 深土体剖面各点脱盐率介于 51.82% ~ 60.43% 之间,每公顷平均投入成本在 35 370 ~ 47 940 元之间,15 m 间距小区每公顷成本略高。

(3)在滴灌淋洗基础上,排水初期各小区流量爆发式增长,随后达到相对稳定的状态,此后逐渐降低,15 m 间距小区排水阶段流量最大,达到 2 m^3/h。排水期间矿化度处于较高水平,最高达到 189.15 g/L,电导率介于 25.1 ~ 35.9 mS/cm 之间。

(4)根据淋洗曲线得到的拟合结果,滴灌条件下暗管间距在 15 m 时土壤脱盐淋洗效果及节水潜力最好,初步认为 15 m 间距适宜作为新疆盐渍土暗管排水间距的布设参数。

参 考 文 献

1 王洁萍,刘国勇,朱美玲. 新疆农业水资源利用效率测度及其影响因素分析[J]. 节水灌溉, 2016(1):63 - 67.
WANG Jieping, LIU Guoyong, ZHU Meiling. Measurement and influential factors of irrigation water use efficiency in Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2016(1):63 - 67. (in Chinese)

2 彭杰,刘焕军,史舟,等. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演[J]. 农业工程学报,2014,30(17):167 - 174.
PENG Jie, LIU Huanjun, SHI Zhou, et al. Regional heterogeneity of hyper spectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):167 - 174. (in Chinese)

3 刘新永,田长彦. 棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):82 - 85.
LIU Xinyong, TIAN Changyan. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in South Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6):82 - 85. (in Chinese)

4 朱宏伟,夏军,曹国栋,等. 盐渍化弃耕地土壤盐分动态及其影响因素[J]. 土壤,2013,45(2):339 - 345.
ZHU Hongwei, XIA Jun, CAO Guodong, et al. Dynamic change of soil salinity in salinization abandoned farmland and affecting factors[J]. Soils, 2013, 45(2):339 - 345. (in Chinese)

5 潘旭东,杨乐,张凤华,等. 玛纳斯河流域次生盐渍化弃耕地全面生态重建的新理念[J]. 新疆农业科学,2004,41(6):431 - 434.
PAN Xudong, YANG Le, ZHANG Fenghua, et al. New conception on the overall ecosystem reconstruction of secondary salinization wasteland in Manas River valley[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2004, 41(6):431 - 434. (in Chinese)

6 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140824&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.024.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):149 - 159. (in Chinese)

7 牟洪臣,虎胆·吐马尔白,苏里坦,等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2011,27(7):18 - 22.
MU Hongchen, HU Dan·Tumaerbai, SU Litan, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 18 - 22. (in Chinese)

8 张伟,吕新,李鲁华,等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报,2008,24(8):15 - 19.
ZHANG Wei,LÜ Xin, LI Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15 - 19. (in Chinese)

9 杨鹏年,董新光,刘磊,等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控[J]. 农业工程学报,2011,27(12):90 - 95.
YANG Pengnian, DONG Xinguang, LIU Lei, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 90 - 95. (in Chinese)

10 吕殿青,王全九,王文焰,等. 膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J]. 土壤学报,2002, 39(6):794 - 801.
LÜ Dianqing,WANG Quanjiu, WANG Wenyan, et al. Factors affecting soil water movement and solute transport for film drip irrigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 794 - 801. (in Chinese)

11 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,2000,23(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,2000,23(2):177 - 181. (in Chinese)

12 李显溦,左强,石建初,等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析Ⅰ:模型与参数验证[J]. 水利学报,2016,47(4):537 - 544.
LI Xianwei, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China I: calibration to models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(4): 537 - 544. (in Chinese)

13 MASTROCICCO M. Contribution of the subsurface drainage system in changing the nitrogen speciation of an agricultural soil located in a complex marsh environment[J]. Agricultural Water Management, 2013, 119(3):144 - 153.

14 WISKOW E, VAN DER PLOEG R R. Calculation of darin spacings for optimal rainstorm floord control[J]. Journal of Hydrolgy,

2003, 274(1 – 4):163 – 174.

15 MOUSTAFA M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large scale subsurface drainage design in Egypt[J]. Agricultural Water Management, 2000, 42(3):29 – 32.

16 PECK A J, HATTON T. Salinity and the discharge of salts from catchments in Australia[J]. Journal of Hydrology,2003,272(1 – 4):191 – 202.

17 MIRZAKHAYOT I,CHRISTOPHER M, LAMERS J P A, et al. The dynamics of groundwater table and salinity over 17 years in Khorezm[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1):52 – 61.

18 KLADIVKO E J, FRANKENBERGER J R, JAYNES D B, et al. Nitrate leaching to subsurface drains as affected by drain spacing and changes in crop production system[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(5):1803 – 1813.

19 BAHCECI I, NACAR A S. Subsurface drainage and salt leaching in irrigated land in south-east Turkey[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 58(3):346 – 356.

20 RITZEMA H P, SATYANARAYANA T V, BOONSTRA J. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: lessons learned in farmers' fields[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(3): 179 – 189.

21 马力. 利通区农业综合开发项目区暗管排水运行情况的调查[J]. 宁夏农林科技, 2007(4):54,39.

22 周明耀. 滨海盐土地区暗管排水系统布置模式的研究[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2000,21(3):34 – 38.

23 张万钧,龙怀玉,郭育文. 天津滨海园林绿化中盐土治理的理论及工艺[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):40 – 44.

24 YU S H, LIU J T, LI Z X, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012,20(12):1664 – 1672.

25 李显溦,左强,石建初,等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析Ⅱ:模型应用[J]. 水利学报,2016,47(5):616 – 625.
LI Xianwei, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China Ⅱ: application of the calibrated models and parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(5):616 – 625. (in Chinese)

26 陶园, 王少丽, 许迪,等. 改进暗管排水技术淤堵防护措施试验研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6):187 – 192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160624&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.024.
TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Experimental study of clogging defense measures for improved subsurface drainage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):187 – 192. (in Chinese)

27 陶园, 王少丽, 许迪,等. 改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4):113 – 118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.016.
TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Effect of structure-type on improved subsurface drainage performance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):113 – 118. (in Chinese)

28 陈阳,张展羽,冯根祥,等. 滨海盐碱地暗管排水除盐效果试验研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(3):38 – 41.
CHEN Yang, ZHANG Zhanyu, FENG Genxiang, et al. Desalination of subsurface pipe drainage in saline-alkali land of coastal areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(3):38 – 41. (in Chinese)

29 朱海波,俞双恩,王君. 沿海新垦区灌水和降雨条件下暗管排水洗盐效果试验研究[J]. 中国农村水利水电,2015(2):99 – 104.
ZHU Haibo, YU Shuang'en, WANG Jun. Experimental research on soil desalting by subsurface pipe drainage in new reclamation land of coastal areas under the condition of irrigation and rainfall[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(2):99 – 104. (in Chinese)

30 HENK R. Subsurface drainage to enable the cultivation of winter crops in consolidated paddy fields in Northern Iran[J]. Sustainability, 2016, 8(3):No. 249.

31 CHAHAR B R, VADODARIA G P. Drainage of ponded surface by an array of ditches[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(6):815 – 823.

32 VADODARIA G P. Steady subsurface drainage of homogeneous soils by ditches[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 2008, 161 (6):303 – 311.

33 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品,2014(9):184 – 184.

34 MMOLAWA K, OR D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1):163 – 190.

35 KHOSLA B K. Salt leaching and the effect of gypsum application in a saline-sodic soil[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(3):193 – 202.

36 张金龙,张清,王振宇,等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(9):85 – 89.
ZHANG Jinlong,ZHANG Qing,WANG Zhenyu, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil[J]. Transactions of the CSAE,2012, 28(9): 85 – 89. (in Chinese)

37 刘玉国,杨海昌,王开勇,等. 新疆浅层暗管排水降低土壤盐分提高棉花产量[J]. 农业工程学报,2014,30(16):84 – 90.
LIU Yuguo, YANG Haichang, WANG Kaiyong, et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 84 – 90. (in Chinese)

38 田玉福,窦森,张玉广,等. 暗管不同埋管间距对苏打草甸碱土的改良效果[J]. 农业工程学报,2013,29(12):145 – 153.
TIAN Yufu, DOU Sen, ZHANG Yuguang, et al. Improvement effects of subsurface pipe with different spacing on sodic-alkali soil[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 145 – 153. (in Chinese)