

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0103

膜下滴灌盐碱地排水工程控盐效果  
试验研究阿尔娜古丽·艾买提<sup>1,2</sup>, 刘洪光<sup>1,2\*</sup>, 何新林<sup>1,2</sup>,  
李明思<sup>1,2</sup>, 龚萍<sup>1,2</sup>(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 石河子大学现代节水灌溉兵团  
重点实验室, 新疆 石河子 832000)

阿尔娜古丽

**摘要:** 针对新疆玛纳斯河流域下野地灌区土壤盐渍化问题,以试验区已有的支排和农沟为基础,增加暗管排水工程,形成暗管和明沟相结合的排水系统,并对试验区膜下滴灌与明沟及暗管排水工程相结合的农田灌排模式控盐效果进行试验研究.设置距明沟(暗管)8,16,24 m处为取样点,于2012—2014年不同季节在试验区对地下水位、土壤剖面(0~200 cm)盐分进行监测,对土壤总盐含量进行分析,结果表明:暗管及明沟均能有效降低地下水位,明沟和暗管可将地下水位分别控制在1.6~2.2,1.5~2.2 m;2014年相比2012年,0~200 cm土层深度,暗管取样点处(8,16,24 m)土壤总盐含量分别下降42.99%,36.84%,24.41%;根系层(0~80 cm)土壤总盐含量分别下降50.34%,40.70%,30.76%;明沟取样点处(8,16,24 m)0~200 cm深度土壤总盐含量分别下降46.85%,38.12%,30.80%;根系层(0~80 cm)土壤总盐含量分别下降54.88%,43.39%,33.21%.研究可为干旱、半干旱灌区有效治理盐碱地提供理论依据和技术参考.

**关键词:** 盐碱地;明沟排水;暗管排水;排水工程设计;土壤盐分

**中图分类号:** S276.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)04-0347-07

阿尔娜古丽·艾买提,刘洪光,何新林,等.膜下滴灌盐碱地排水工程控盐效果试验研究[J].排灌机械工程学报,2018,36(4):347-353.

A ERNAGULI · Aimaity, LIU Hongguang, HE Xinlin, et al. Experimental study on salt controlling effect in drainage system in saline-alkali land with drip irrigation under mulch[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018,36(4):347-353. (in Chinese)

## Experimental study on salt controlling effect in drainage system in saline-alkali land with drip irrigation under mulch

A ERNAGULI · Aimaity<sup>1,2</sup>, LIU Hongguang<sup>1,2\*</sup>, HE Xinlin<sup>1,2</sup>, LI Mingsi<sup>1,2</sup>, GONG Ping<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** In order to control the soil salinization, a series of tests were carried out on a piece of saline-alkali land in Xiayedi irrigation district of Manasi in Xinjiang, where the subsurface drainage was arranged based on the existing rows and farm ditch. The salt controlling effect in the drainage system combined with the subsurface drainage and the ditch drainage in the saline-alkali land with drip irri-

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-08-10; 网络出版时间: 2018-03-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180302.1015.044.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51669029, U1403183, 41361071); 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0501402, 2016YFC0501406)

第一作者简介: 阿尔娜古丽·艾买提(1993—),女,新疆阜康人,硕士研究生(420335071@qq.com),主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究.

通信作者简介: 刘洪光(1980—),男,山东金乡人,副教授(liuhongguang-521@163.com),主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究.

gation under mulch was studied experimentally. The sampling points were set at 8 m, 16 m, and 24 m of the ditch drainage and the subsurface drainage respectively. The underground water table and soil salinity at depths of 0–200 cm were observed, during the different seasons of 2012–2014. The results show that both the subsurface drainage and the ditch drainage can control the underground water table, ranging from 1.6 m to 2.2 m in the ditch draining area and ranging from 1.5 m to 2.2 m in the subsurface drainage area. Compared with the year 2012, soil total salt of each sampling point at depths of 0–200 cm in the subsurface drainage area decreases by 42.99%, 36.84% and 24.41% in 2014. At the root layer, soil total salt of each sampling point decreases by 50.34%, 40.70% and 30.76%. For the ditch drainage, soil total salt of each sampling point at depths of 0–200 cm decreases by 46.85%, 38.12% and 30.80%. At the root layer, soil total salt of each sampling point decreases by 54.88%, 43.39% and 33.21%. This study provides a reference for saline–alkali land management in arid and semi-arid areas.

**Key words:** saline–alkali land; ditch drainage; subsurface drainage; drainage engineering design; soil salinity

新疆地处西北干旱区,降雨稀少,蒸发强烈,水资源短缺,盐碱土分布面积广.膜下滴灌技术因具有明显的节水、保温、抑盐、增产效果,在新疆盐碱地应用广泛,是新疆农业可持续发展的重要灌溉模式<sup>[1]</sup>.但有学者指出,随着滴灌年限的增长,覆膜间裸地盆地与农田盐分含量有增加趋势.弋鹏飞等<sup>[2]</sup>针对年限对棉田膜下滴灌盐分累积影响研究发现,土壤盐分随膜下滴灌年限延长呈逐渐累积的趋势;李明思等<sup>[3]</sup>对长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化进行分析并发现,滴头表层土壤盐分有聚集现象;同类研究<sup>[4–5]</sup>也认为,农田土壤盐分含量随着膜下滴灌技术年限延长而增加.因此在农田增加排水工程系统将盐分排出农田,防止农田土壤次生盐碱化是十分有必要的.陈丽娟等<sup>[6]</sup>对明沟排水条件下农田的水分运动、盐分运移、明沟设计参数进行了研究,都认为明沟排水有显著的排盐和控制地下水的作用,并给出设计建议.但是明沟排水占地面积大,维护费用高,且不符合现代农业集约化的发展思路.暗管排水技术由于其占地面积少、受外界条件影响小、维修和管理方便等特点成为现代排水技术的焦点.张展羽等<sup>[7]</sup>对暗管排水排盐技术做了研究,结果表明暗管排水工程可有效地降低地下水位,改良盐碱地.在采用暗管排水系统的同时结合

膜下滴灌进行灌溉形成农田排水,将盐分排出农田以外,是一种节水省地的农田排盐方式.

文中针对新疆灌区盐碱地膜下滴灌与明沟及暗管排水工程相结合的控盐效果进行试验研究,旨在为干旱、半干旱区有效治理盐碱地提供理论依据和技术参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2012—2014年在新疆玛纳斯河流域下野地灌区南部盐碱试验地进行(85°27′~85°41′E, 44°37′~44°48′N).该研究区土壤质地为沙壤土,年平均日照时数2 861.6 h,年均降雨量141.8 mm,年均潜在蒸发量1 826.2 mm,无霜期平均166 d.试验3 a期间主要种植作物为棉花、苜蓿等,灌溉方式为膜下滴灌.试验期间种植作物情况见表1,其中 $m$ 为产量, $q$ 为灌水定额.灌溉制度见表2.

表1 试验地种植作物概况  
Tab.1 Planted crops of test area

年份	作物	播种期	收获期	$m/(kg \cdot hm^{-2})$	$q/mm$
2012	苜蓿	4.20	9.10	13 340	747.3
2013	棉花	4.28	9.20	3 600	750.7
2014	棉花	4.26	9.23	4 170	751.2

表2 试验地灌溉制度  
Tab.2 Experimental zone irrigation system

灌水时间	5月上旬	5月中旬	6月中旬	6月下旬	7月上旬	7月中旬	7月下旬	8月中旬	8月下旬	合计
2012	120.0	50.7	79.5	82.6	78.6	86.4	95.6	82.1	71.8	747.3
2013	70.1	50.3	78.9	83.1	79.3	88.0	96.6	83.1	121.3	750.7
2014	122.1	49.9	80.1	83.4	79.1	87.5	95.3	81.6	72.2	751.2

研究区紧邻玛纳斯河干渠,灌溉季节地下水位在1.2 m左右.其原有排水工程布置为1条支排(东

西走向,沟深为2.3~2.4 m),4条农沟(南北走向,沟深为2.3~2.4 m)与支排相连,间距分别为

502.0, 519.1, 510.6 m. 由于渗漏严重, 渠内淤积等问题, 排水明沟未能起到良好的降水排盐作用, 试验地土壤盐碱化严重. 试验地于2011年增加暗管排水工程<sup>[8-10]</sup>与原明沟排水工程相结合, 共同作用进行降水排盐. 试验地原有排水系统布置如图1所示.

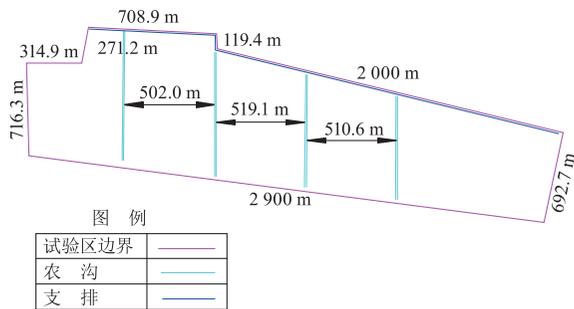


图1 试验地原有排水系统示意图

Fig. 1 Early water conservancy project layout diagram in study area

### 1.2 暗管排水系统

依据《灌溉排水工程学》, 考虑坡降、土壤参数、地下水情况等<sup>[11]</sup>, 计算暗管间距为48 m, 暗管埋深为2.2 m. 选取暗管管材为聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 波纹管, 鉴于排水管的规格和试验地排水的可靠性, 文中确定暗管管径为0.07 m, 满足排水需要. 试验区暗管排水系统布置如图2所示. I区共布置11条暗管, II区共布置10条暗管, III区共布置10条暗管, IV区共布置10条暗管, V区共布置19条暗管, 共60条暗管. I, II, IV, V区暗管将水直接排入支排, 以支排作为集水渠; III区暗管将水排入农沟, 再通过农沟汇入支排, III区暗管以农沟作为集水渠.

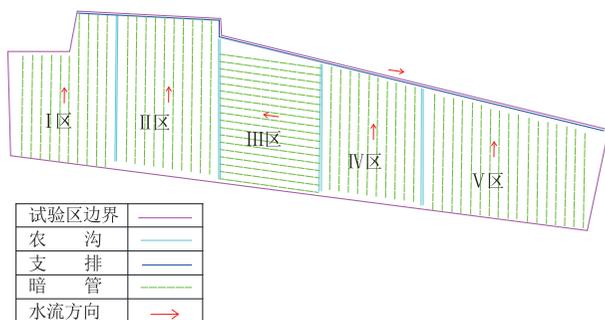


图2 试验区暗管分布设计示意图

Fig. 2 Water conservancy project layout diagram in study area

### 1.3 田间观测内容

#### 1.3.1 取样时间及方法

考虑该试验地作物灌溉周期及生长期, 于

2012—2014年5—10月期间进行取样, 共计6次 (2012年6月9日、10月4日, 2013年5月28日、7月30日、9月20日, 2014年10月30日). 利用GPS定位, 保证每年每次取样均在同一位置进行. 每隔20 cm层次取样, 取样深度直至所取层次土样在自重条件下饱和出水为止, 并认为取样深度即为地下水深度, 替代地下水观测井的作用. 取回的土样及时风干、粉碎、过2 mm土壤筛.

#### 1.3.2 观测点布置

由于暗管与农沟的间距均为48 m, 且暗管均对称分布在农沟两侧, 因此设置距暗管8, 16, 24 m共3个取样点 T1, T2, T3; 距明沟8, 16, 24 m共3个取样点 CK1, CK2, CK3. 观测点布置如图3所示.

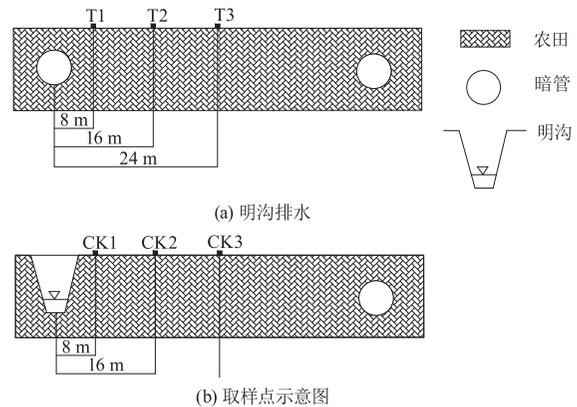


图3 取样点示意图

Fig. 3 Sampling points location

#### 1.3.3 测试指标及方法

1) 土壤含盐量采用电导率法 (FGK-3型, 水土质量比为5:1, ds/m) 测定. 再利用标定法将EC值转化为TDS值对每个土层的盐分进行分析, 标定关系式为

$$TDS = 3.7219EC_{1.5} + 0.4401 (R^2 = 0.9763),$$

式中: TDS为土壤含盐量, g/kg; EC为土壤电导率值, ms/cm.

2) 土壤脱盐率计算公式为

$$\text{土壤脱盐率}\% = (\text{上一年土壤含盐总量} - \text{下一年土壤含盐总量}) / \text{上一年土壤含盐总量} \times 100\%.$$

3) 土壤不同深度总盐含量计算公式为

$$y = \int_0^x f(x) dx, \quad (1)$$

式中: y为土壤0~200 cm深度总含盐量, g; f(x)为土壤各深度层盐分含量函数; x为各不同深度层土壤质量, g.

其中

$$f(x) = \gamma\theta V, \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为土壤容重, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\theta$ 为不同深度层土壤TDS值, $\text{g}/\text{kg}^{-1}$ ; $V$ 为不同深度层土壤体积, $\text{m}^3$ . 计算土壤体积时将每个深度层的土壤都看成为长、宽、高均为20 cm的土块进行计算,可计算得 $v = 0.008 \text{ m}^3$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 对地下水的影响

图4为明沟及暗管排水工程对试验地地下水水位的影响,其中 $l_1$ 为距明沟的距离, $l_2$ 为距暗管的距离, $h$ 为地下水埋深.从图中可以看出,由于受到灌溉及蒸发的影响,地下水水位呈波动变化,但整体上距离明沟及暗管越近,地下水水位埋深越大.明沟与暗管均有效地降低了试验地地下水水位,明沟排水将地下水水位控制在1.6~2.2 m,暗管排水将地下水水位控制在1.5~2.2 m.由于暗管距明沟距离为48 m,且各个暗管间距均为48 m,因此认为取样距明沟(暗管)24 m为最不利距离,此处的地下水水位为1.5 m,说明明沟及暗管均能有效地控制地下水水位.整体上,呈距离明沟及暗管越近,地下水水位下降越明显的趋势.

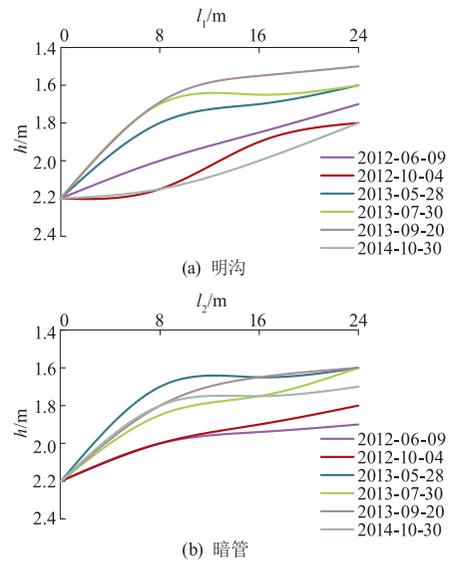


图4 明沟及暗管对地下水水位埋深影响

Fig. 4 Effects of ditch drainage and subsurface drainage on underground water table

### 2.2 对不同土层土壤控盐效果分析

图5为各采样时期,土壤各剖面对应不同明沟及暗管距离土壤盐分变化特征,图中 $d$ 为土壤剖面深度, $\theta$ 为土壤含盐量.

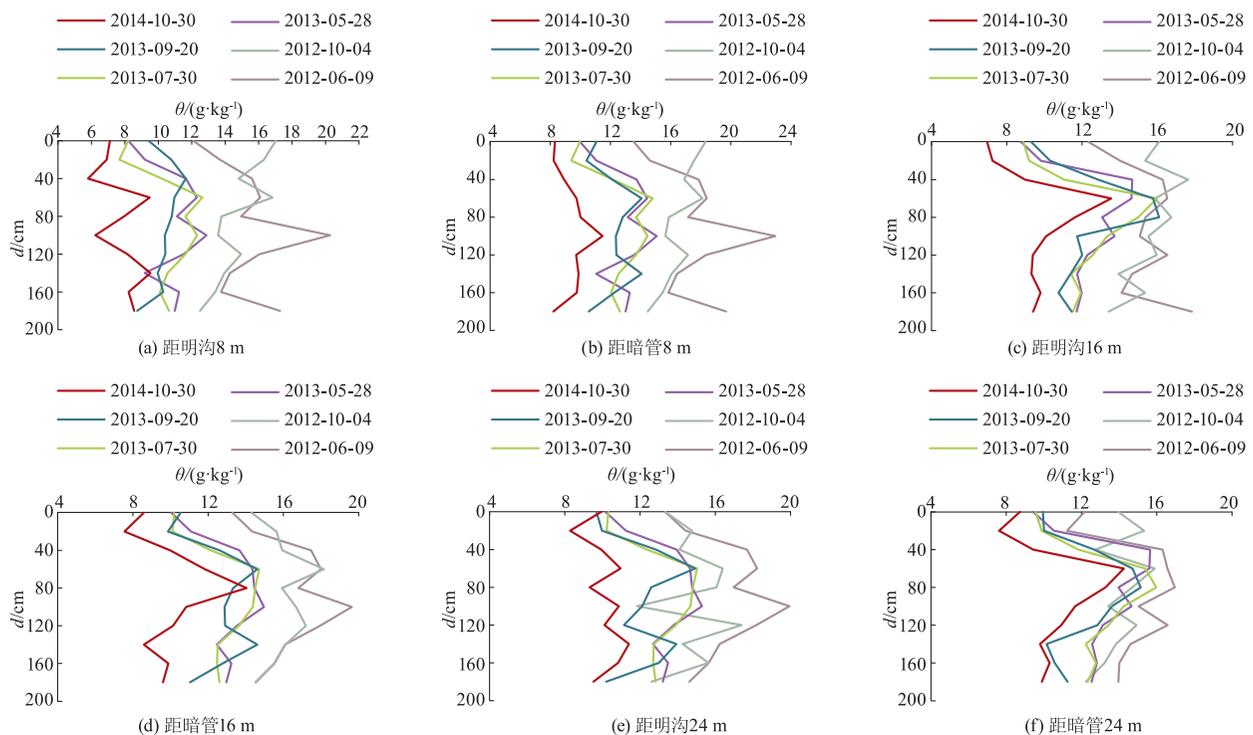


图5 明沟及暗管排水下盐分分布特征

Fig. 5 Soil salinity distribution characteristics under the ditch drainage and subsurface drainage

从图5中可以看出,2012—2014年各土层土壤盐分整体呈逐年下降趋势.2012年盐分下降幅度变

化大,2013及2014年盐分变化幅度趋于稳定.这是由于膜下滴灌技术与暗管、明沟排水工程地共同作

用,覆膜抑制土壤盐分向上运移,暗管及明沟排水严格地控制了地下水位,阻断了水分上移的来源,使得试验地土壤迅速脱盐.经测定在8 m 采样点处,明沟排水控制区的 $\theta$ 值由12.09~20.27 g/kg 下降到5.80~9.53 g/kg;暗管排水控制区的 $\theta$ 值由12.54~22.95 g/kg 下降到8.20~11.47 g/kg;在16 m 采样点处,明沟排水控制区的 $\theta$ 值由12.34~17.84 g/kg 下降到6.96~13.55 g/kg;暗管排水控制区的 $\theta$ 值由13.29~19.64 g/kg 下降到7.55~14.04 g/kg;在24 m 采样点处,明沟排水控制区的 $\theta$ 值由13.33~19.94 g/kg 下降到8.28~11.41 g/kg;暗管排水控制区的 $\theta$ 值由11.23~16.96 g/kg 下降到7.62~14.25 g/kg.说明距离明沟及暗管越近,排盐的效果越好.这是由于离明沟及暗管水平距离越近,水力梯度越大,水分入渗强度越大;离明沟及暗管水平距离越远,水力梯度越小,水分入渗强度越小,这就导致了距离明沟及暗管距离越近,脱盐效果越明显<sup>[12-13]</sup>.

### 2.3 土壤总盐变化分析

图6为0~200 cm 土层土壤盐分累积变化.

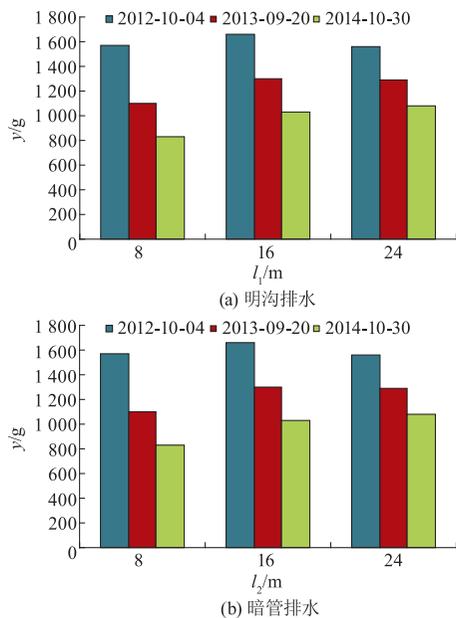


图6 0~200 cm 土层土壤盐分累积变化  
Fig.6 Total salt content of soil at depths of 0-200 cm

灌溉结束后(10月),距暗管8,16,24 m 处土壤总盐含量均呈现逐年下降趋势.与2012年相比2013年土壤脱盐率为26.14%,21.67%,13.73%;2014年土壤脱盐率为42.99%,36.84%,24.41%.表明整个土体总盐含量随暗管排水技术使用年限增长而逐年降低,对盐碱地改良效果明显,距离暗

管越近,排盐效果越明显.距明沟8,16,24 m 处取样点土壤总盐含量变化也表现为逐年下降,与2012年相比,2013年土壤脱盐率为29.64%,21.91%,17.67%;2014年土壤脱盐率分别为46.85%,38.12%,30.80%.

图7为0~80 cm 土层土壤盐分累积变化.

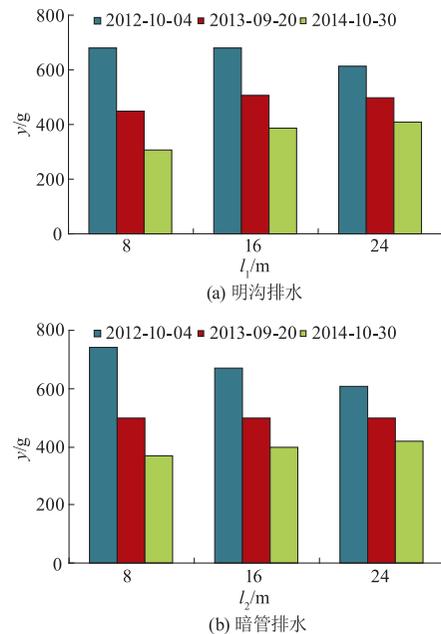


图7 0~80 cm 土层土壤盐分累积变化  
Fig.7 Total salt content of soil at depths of 0-80 cm

距暗管8,16,24 m 处取样点处土壤总盐含量亦为逐年下降趋势.与2012年相比2013年土壤脱盐率为32.72%,25.56%,18.13%;2014年土壤脱盐率为50.34%,40.70%,30.76%.距明沟8,16,24 m 处,土壤总盐含量逐年下降趋势更加明显.与2012年相比,2013年土壤脱盐率为34.09%,25.65%,18.96%;2014年土壤脱盐率分别为54.88%,43.39%,33.21%.

经过3 a 连续监测表明无论是明沟还是暗管排水工程都可以有效地降低土壤盐分含量.

## 3 讨论

经过多年持续利用,明沟与暗管周围的土壤盐分逐年下降,距离明沟及暗管越近,盐分下降越快;0~80 cm 土层盐分下降速度快,因为覆膜抑制了蒸发,农田土壤水分向上运动由原来的棵间蒸发和植物蒸腾2个渠道变成了植物蒸腾单一渠道,因此水分向上运动的趋势大大减少.由于排水系统使农田水分向下运动有了通道,所以在农田,水分整体运

动的趋势是向下的,并带动了盐分向下运动,且在根系层覆膜抑制蒸发起主要作用,因此0~80 cm 土层盐分下降速度快.80~200 cm 土层盐分下降速度相对较慢,因为与0~80 cm 土层相比较,覆膜抑制蒸发对盐分运动的影响作用减弱,排水起主要作用,距离暗管越近,排盐速率越快,距离暗管越远,排盐速率相对减慢,形成了距暗管近的区域盐分少,距暗管远的区域盐分多的状况,依据溶质运移规律及盐分平衡原理,农田中的盐分会随着时间的推移由盐分多的区域向盐分少的区域运移,从而形成了土壤盐分整体下降,根系层盐分下降更加明显的结果.

干旱区降雨稀少,蒸发强烈,土壤盐分向土体表面聚集,利用常规工程措施排盐,需要大量水.在干旱区可以靠控制性排水使土壤达到饱和并与暗管排水技术结合,将土壤中的盐分随水通过暗管排出农田.年际内土壤在饱和-非饱和状态中转化,盐分在土壤的饱和-非饱和状态转化中运动,形成土体中较为均匀的盐分分布状态,且持续整体排盐.试验证明,明沟与暗管排盐效率相差不大,但是暗管排水具有提高土地利用、减少清淤、方便田间机械作业等优点,相比明沟排水减少了人力、物力及时间的投资成本,与孟凤轩等<sup>[14]</sup>的研究结果一致,说明暗管排水在干旱区有推广应用的价值.

## 4 结 论

1) 暗管与明沟结合的排水工程可以有效地控制地下水位,降低土壤盐分.在干旱区,明沟与暗管设计合理的情况下,两项工程对地下水埋深及排盐的调控能力相差不大,明沟和暗管均能将地下水位控制在1.5 m 以下.

2) 暗管与明沟排水相结合可以降低土壤盐分.经过3 a 试验,明沟排水0~80 cm 深度土壤整体脱盐率约43.8%,0~200 cm 深度土壤整体脱盐率约为35.6%;暗管排水0~80 cm 深度土壤整体脱盐率约为40.6%,0~200 cm 深度土壤整体脱盐率约为34.7%.

### 参考文献 (References)

[1] 宁松瑞,左强,石建初,等.新疆典型膜下滴灌棉花种植模式的用水效率与效益[J].农业工程学报,2013,29(22):90-99.  
NING Songrui, ZUO Qiang, SHI Jianchu, et al. Water

use efficiency and benefit for typical planting modes of drip-irrigated cotton under film in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):90-99. (in Chinese)

- [2] 弋鹏飞,虎胆·吐马尔白,吴争光,等.棉田膜下滴灌年限对土壤盐分累积的影响研究[J].水土保持研究,2010,17(5):118-122.  
YI Pengfei, HUDAN·Tumaerbai, WU Zhengguang, et al. Research on soil salt accumulation influence by the years of covered cotton under drip irrigation[J]. Research of soil and water conservation, 2010, 17(5):118-122. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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, HUDAN·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)
- [5] 谭军利,康跃虎,焦艳萍,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)
- [6] 陈丽娟,冯起,张新民,等.明沟排水洗盐条件下土壤水盐动态模拟研究[J].水土保持研究,2010(1):235-238.  
CHEN Lijuan, FENG Qi, ZHANG Xinming, et al. Simulation study on dynamic of soil water and salt of salt leaching with drainage ditch[J]. Journal of soil and water conservation, 2010(1):235-238. (in Chinese)
- [7] 张展羽,张月珍,张洁,等.基于DRAINMOD-S模型的滨海盐碱地农田暗管排水模拟[J].水科学进展,2012,23(6):782-788.  
ZHANG Zhanyu, ZHANG Yuezhen, ZHANG Jie, et al. Simulating subsurface pipe drainage in saline-alkali farmland along coastlines using the DRAINMOD-S model[J]. Advances in water science, 2012, 23(6):782-788. (in Chinese)

- [ 8 ] 高正夏. 新疆玛河安集海灌区给水度变化规律及试验研究[J]. 地下水, 2014(1):8-11.  
GAO Zhengxia. Experimental study on variation of specific yield in irrigation area of Anjihai in Xinjiang[J]. Ground water, 2014(1):8-11. (in Chinese)
- [ 9 ] 郭斌,赵新俊,王璞,等. 新疆膜下滴灌高产春玉米水肥优化研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20):88-93.  
GUO Bin, ZHAO Xinjun, WANG Pu, et al. Study on optimization of water and fertilizer for high-yield spring maize under drip irrigation in Xinjiang area[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2017, 45(20):88-93. (in Chinese)
- [ 10 ] RITZEMA H P, NIJLAND H J, CROON F W. Subsurface drainage practices; from manual installation to large-scale implementation [J]. Agricultural water management, 2006, 86(1/2):60-71.
- [ 11 ] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国农业出版社, 2010.
- [ 12 ] 张金龙, 闻铁, 王鹏山, 等. 暗管排水控制区土壤盐分淋洗研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):242-246.  
ZHANG Jinlong, WEN Tie, WANG Pengshan. Studies on salt-leaching of soil in the region between subsurface drains [J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28(5):242-246. (in Chinese)
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 孟凤轩, 迪力夏提, 罗新湖, 等. 新垦盐渍化农田暗管排水技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1):106-109.  
MENG Fengxuan, Dilixiti, LUO Xinhu, et al. Experiment research of the subsurface pipe drainage technology in the new exploited salinification farmland[J]. Journal of irrigation and drainage, 2011, 30(1):106-109. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)

(上接第346页)

- [ 6 ] 孔令阳, 范兴科. 文丘里施肥器吸肥性能试验研究[J]. 节水灌溉, 2013(7):4-6.  
KONG Lingyang, FAN Xingke. Experimental study on fertilizer suction performance of Venturi injector [J]. Water saving irrigation, 2013(7):4-6. (in Chinese)
- [ 7 ] 张晓明, 鲍安红, 谢守勇, 等. 基于 Fluent 的文丘里管结构参数对吸肥性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18):208-210.  
ZHANG Xiaoming, BAO Anhong, XIE Shouyong, et al. Effect of structural parameters of Venturi tube on absorption properties of a fertilizer based on Fluent[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2017, 45(18):208-210. (in Chinese)
- [ 8 ] 王淼, 黄兴法, 李光永. 文丘里施肥器性能数值模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):27-31.  
WANG Miao, HUANG Xingfa, LI Guangyong. Numerical simulation of characteristics of Venturi injector [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7):27-31. (in Chinese)
- [ 9 ] 严海军, 王子君, 陈燕. 文丘里施肥器空化过程高速摄像分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10):901-905.  
YAN Haijun, WANG Zijun, CHEN Yan. High-speed photography analysis on cavitation of Venturi injector [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(10):901-905. (in Chinese)
- [ 10 ] GHASSEMI H, FASIH H F. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter [J]. Flow measurement & instrumentation, 2011, 22(5):406-412.
- [ 11 ] GONCALVES E, DECAIX J, PATELLA R F. Unsteady simulation of cavitating flows in Venturi [J]. Journal of hydrodynamics (Ser B), 2010, 22(5):753-758.
- [ 12 ] DITTAKAVI N, CHUNekar A, FRANKEL S. Large eddy simulation of turbulent-cavitation interactions in a Venturi nozzle [J]. Journal of fluids engineering, 2010, 132(12):121301.
- [ 13 ] SAYYAADI H. Instability of the cavitating flow in a venturi reactor [J]. Fluid dynamics research, 2010, 42(5):055503.
- [ 14 ] 全国塑料标准化技术委员会. 热塑性塑料注射成型收缩率的测定:GB/T 15585—1995 [S]. 上海:机械工业出版社上海材料研究所, 1995.

(责任编辑 徐云峰)