DOI：10.11766/trxb201706200271

滴灌条件下排水暗管埋深及管径对土壤盐分的影响*

衡 通[1] 王振华[1†] 李文昊[2] 张金珠[2] 杨彬林[1]

（1 石河子大学水利建筑工程学院，新疆石河子 832000）

（2 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆石河子 832000）

摘 要 为探索高效节水的暗管排盐技术，通过田间灌溉排水试验，研究了滴灌条件下排水暗管不同管径（50、90 mm）、和不同埋深（0.6、1.0、1.4 m）对土层含盐量分布及脱盐效果的影响。结果表明：两次灌水后各土层脱盐效果差别较大。0～60 cm土层脱盐程度较高，土壤含盐量已降至12 g kg^{-1}以下中度盐化水平，100 cm以下土层脱盐效果不明显；暗管0.6 m埋深脱盐效果优于1.0、1.4 m埋深，总体盐分减少14.34 g kg^{-1}，相比未铺设暗管对照减少了13.32 g kg^{-1}。增加暗管埋深至1.4 m对暗管降盐效果无显著影响；暗管管径对各土层盐分的影响相对更加显著，90 mm管径相较50 mm管径暗管脱盐效果明显，50、90 mm管径暗管不同埋深0～1.4 m土层脱盐率分别在20.69%～30.20%和34.59%～57.04%之间。暗管埋深0.6 m、管径90 mm时，两次灌水后0～60 cm土层已降至轻度盐化水平（3～6 g kg^{-1}），暗管排水排盐效率较高，为北疆盐渍土的暗管排水最优埋深与管径布设参数。

关键词 滴灌；暗管排水；盐碱土；设计参数；脱盐率

中图分类号 S278 **文献标识码** A

新疆一直是中国西北地区盐碱土分布面积最大、最集中和盐碱威胁最严重的省份之一，盐碱地面积约2.2×10^7 hm^2[1]，其中已改良的宜耕地面积不到25%。水资源短缺和土壤盐碱化严重制约了新疆农业的发展[2]。膜下滴灌对农业具有节水、增收的作用，对盐碱地具有较强的适应能力，随着其运用年限的累积[3]，在新疆现行灌溉制度下，膜下滴灌全生育期内均不排水，由最初的“渠道漫灌”转变为“有灌无排”[4]。已有研究结果表明[5]，根系层积盐量已达到0.36 g kg^{-1} a^{-1}，盐分在田间土层的不断积累[6-8]，有必要探索膜下滴灌条件下盐碱地改良的模式或方法。

改良盐碱地方式众多，运用大水漫灌配合暗管排水排盐是最直接、最快捷的改良方式之一[9]。我国自20世纪80年代引进暗管排水，并取得了显著的效果，张兰亭[10]在山东省打鱼张灌区利用不同管材（陶管、砾石水泥滤水管和波比水泥管），设计2种间距、3种埋深、4种管径的田间暗管排水试验，提出了不同工程布局下暗管排水的改碱效果及其适宜条件，为今后推广暗管排水改良盐碱地技术提供了科学依据。于淑会等[11]对暗管排盐及绿化配套的技术参数进行了系统研究，提出了不同暗管埋深、间距和管径等技术措施，为暗管排盐技术的发展起到重要推广作用[12]。李显溦等[13]利用HYDRUS软件和小区暗管淋洗试验对相应数值模型和水盐运动参数进行了校验，为长期排盐策略的规划、设计提供了科学可靠的理论依据。朱海波等[14]设计了3种间距（10、15、20 m）和3种埋深（0.6、0.9、1.2 m）的暗管排水组合，研究沿海新垦区暗管排水效果及排水含盐量变化情况，认为在间距相同的情况下，暗管埋深越大，初始排水的盐度、排水中期时段的流量、电导率也越大。李从

* 国家自然科学基金项目（41361071）和“十二五”国家科技支撑计划项目（2015BAD20B03-3）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 41361071）and National "Twelfth Five-Year" Plan for Science and Technology Support of China（No. 2015BAD20B03-3）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：wzh2002027@163.com

作者简介：衡 通（1994—），男，新疆人，硕士研究生，研究方向为灌溉排水理论与新技术。E-mail：htshz121@163.com

收稿日期：2017-06-20；收到修改稿日期：2017-09-14；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2017-10-12

娟等[15]认为暗管排水盐渍土含盐量主要受地下水埋深、矿化度、土壤质地和气候等的影响，在区域尺度上地形因素也是土壤盐分空间分布的影响因子。

研究表明，暗管排水可以有效降低农田地下水埋深[16]、治理涝渍灾害[17]、排除盐分，对提高作物产量均具有显著效果。但采用漫灌时暗管排水无法有效排出根系层中的土壤盐分，土壤次生盐渍化严重[18]，通常每隔几年就必须进行地面冲洗，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。本文选取新疆盐碱区水资源缺乏、蒸发量大、返盐严重的代表性地区，在原有滴灌下设计田间暗管排水排盐试验，研究排水暗管不同管径及埋深对土壤空间盐分分布的影响，以及不同埋深的脱盐效果，为干旱盐荒区改良和弃耕地重建提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选在新疆生产建设兵团141团常年绝收的弃耕地，位于沙湾县安集海乡北端，85°21′E、44°36′N。总规划面积为3.4 hm^2，地势南高北低，南北自然坡降0.24%。年平均气温6.8℃，当地降水少（年降水量182 mm），蒸发大（年蒸发量1 717 mm），地下水埋藏较深（大于4 m）。土壤已达盐土水平（>20 g kg^{-1}）[19]，土壤pH为8.51，田间持水量为14.39%～27.58%。土壤基本理化性质见表1。

1.2 研究方法

试验区埋设50 mm和90 mm两种管径的吸水管，共10条暗管，间距15 m，每条长200 m（见图1）。考虑到试验地不同埋设地段排水脱盐情况，分别在不同管径的0.6、1.0、1.4 m埋深处设置观测点，含未铺设暗管对照区，共7处观测点。吸水管选用带孔PVC单壁波纹管，壁厚3 mm，开孔缝隙≤1 mm，开孔面积>250 $cm^2 m^{-2}$，设计坡降0.4%。集水管为PVC硬塑料管，管径250 mm，壁厚5 mm设计坡降0.3%。

于2016年3—4月春季化雪后在盐荒弃耕地上进行暗管排水试验施工。施工前，在试验区的周围打田埂，按平面布置测量放线，用小型挖掘机按设

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physio-chemical properties of the tested soil

土层深度 Soil depth (cm)	土壤颗粒组成 Soil particlescomposition (%)			质地类型 Texturetype	土壤含盐量 Soilsalt content (g kg^{-1})	容重 Soil bulk density (g cm^{-3})	饱和含水率 Saturated moisture content (%)	渗透系数 Hydraulic conductivity (cmd^{-1})	总孔隙度 Bulk porosity (%)
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay						
0～5	61.8	35.1	3.1	砂质壤土 Sandy loam soil	36.74	1.18	20.17	12.1	54.99
15～20	63.3	34.1	2.6	砂质壤土 Sandy loam soil	26.67	1.16	21.27	9.6	55.53
35～40	51.6	44.1	4.3	壤土Loam soil	27.04	1.25	16.75	8.6	52.62
55～60	52.7	44.8	2.5	壤土Loam soil	28.61	1.20	19.03	8.1	54.33
75～80	53.1	43.9	3.0	壤土Loam soil	25.85	1.17	19.70	8.5	55.19
95～100	53.1	44.7	2.2	壤土Loam soil	26.33	1.17	25.54	8.4	55.45
115～120	45.8	52.2	2.0	粉砂质壤土Silty sandy loam soil	24.58	1.22	18.02	7.1	53.57
135～140	41.4	52.1	6.5	粉砂质壤土Silty sandy loam soil	21.41	1.29	22.41	6.9	51.38

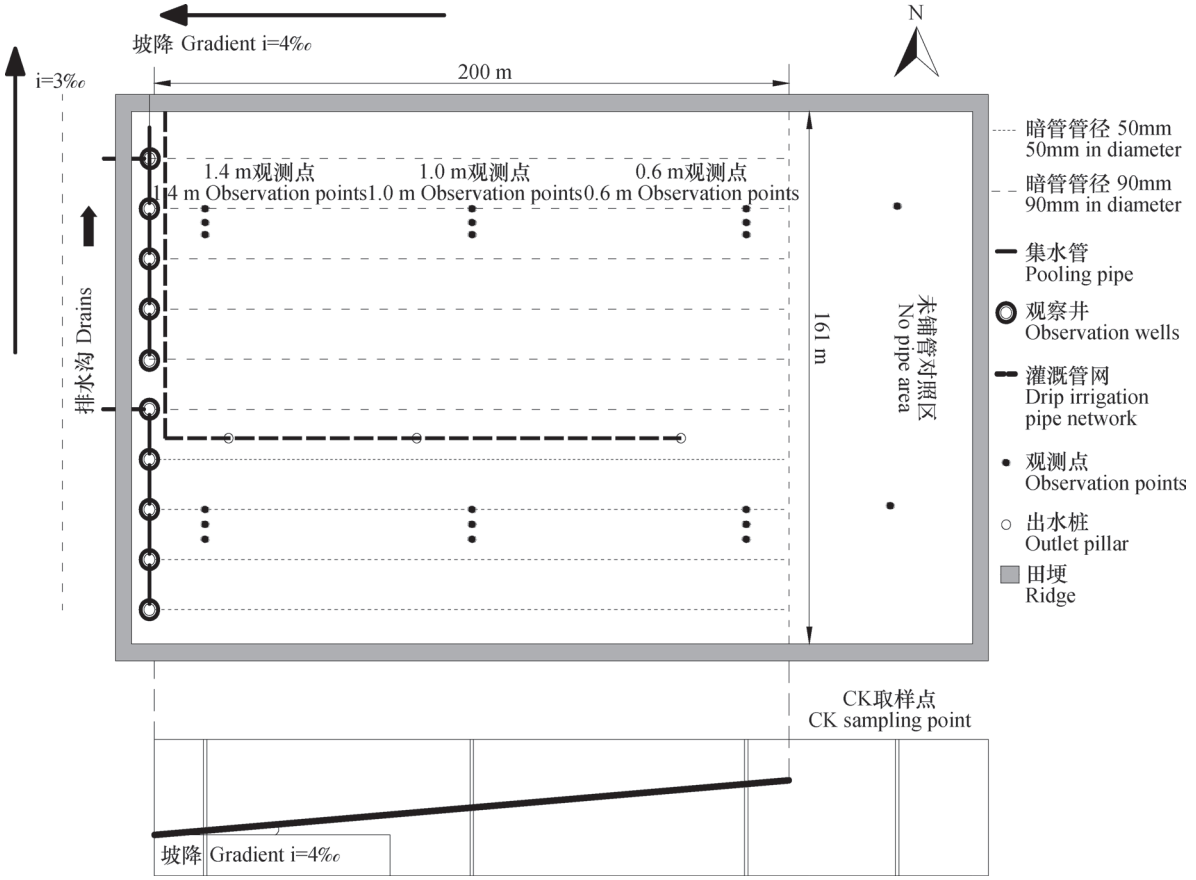

图1　田间滴灌与暗管系统配套试验示意图

Fig. 1　Schematic of the experiment on drip irrigation and underground drainage pipe system

计深度开挖管沟。每挖二十米检查沟深与纵坡，铺设包裹无纺布的吸水管，管周围装填粒径≤4 cm的砂砾石，厚约20 cm，分层回填埋管。除紧靠滤料30 cm的土料不需夯实外，其他均要分层夯实。紧靠滤料30 cm的土料由人工回填，30 cm以上土层需分层夯实。吸水管末端各设置一集水井，选用优质树脂一体式集水井，并由集水管连接，汇入排水沟。暗管工程施工完成后深翻、旋耕整地，深翻深度60 cm，整地标准为±2 cm。

灌溉淋洗采用滴灌的方式，每次大定额淋洗前60 d对试验田（包括对照区域）进行深翻晒地。于6月初铺设滴灌带并播种油葵（*Helianthus annuus* Linn），形成滴灌条件下作物、水利改良双重改土模式，本文着重分析滴灌系统配套暗管排水对土壤盐分的影响，油葵与滴灌配套模式见图2。采用“一膜两管四行”的模式播种，其中地膜宽度1.4 m，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，油葵受盐胁迫

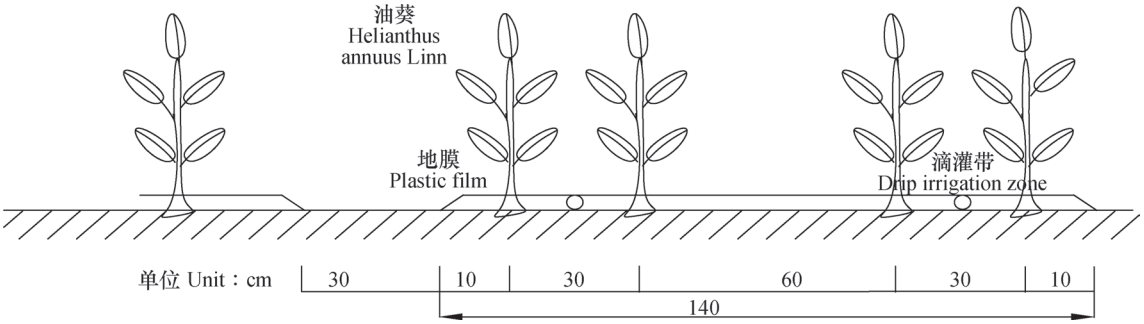

图2　油葵与滴灌配套模式示意图

Fig. 2　Schematic of the Helianthus annuus Linn field and drip irrigation system

长势较差，于9月5日犁地育肥，滴灌带单孔出流量2.6 L h^{-1}，滴头间距30 cm，灌溉水源为地表水（矿化度在0.8 g L^{-1}），为防止地表径流形成漫灌，滴灌模式采用轮灌。灌溉淋洗分两次进行：本试验第一次灌水从2016年6月8日开始，共持续108 h，其中0～60 h为供水阶段，持续灌水量为1 150 mm，47～108 h为排水阶段（水盐重分布阶段，第47小时为首次排水时间）；第二次灌水从2016年9月9日开始，共持续110 h，供水时长64 h，试验区持续灌水量为1 227 mm，暗管排水时长为68 h，未铺设暗管对照区两次滴灌淋洗均未灌水。

1.3 数据的测定与处理

为得到试验地整体排水脱盐情况，分别在50、90 mm管径暗管0.6、1.0、1.4 m埋深处设置观测点，含未铺设暗管对照区，共7处观测点进行土壤取样，各处观测点取3次重复。采样分8次进行，采集土样日期分别为2016年4月5日、2016年5月5日、2016年6月8日、2016年6月17日、2016年7月13日、2016年8月15日、2016年9月8日、2016年9月20日。每次分层取0～3、3～20、20～40、40～60、60～80、80～100、100～120、120～140、140～160、160～180、180～200 cm共计11层土样。

对所取土样烘干后测试其含水率，并将相应土样称取10 g经粉碎过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数显电导率仪测定浸提液电导率（EC）。用干燥残渣法标定出含盐量与电导率之间的关系：

$$y=2.277\mathrm{EC}-0.324\ (R^2=0.98) \qquad (1)$$

式中，y为土壤含盐量，g kg^{-1}；EC为电导率，mS cm^{-1}。

土壤脱盐率的计算公式为：

$$N=\frac{S_1-S_2}{S_1}\times 100\% \qquad (2)$$

式中，N为脱盐率，%；S_1为土壤盐分初始值，g kg^{-1}；S_2为灌后土壤盐分终值，g kg^{-1}。

采用Guelph1800K入渗仪测量土壤渗透性；田间持水率采用室内测定法测定[20]；采用环刀取原状土测定土壤容重；土壤粒径分布采用LSI3320激光粒度仪测定。其他指标采用常规分析方法测定[21]。用Microsoft Excel 2007、SPSS19.0进行数据处理，Origin8.5完成制图。

2 结 果

2.1 暗管不同埋深土层含盐量的变化

两次灌水后各暗管陆续排出高矿化度的水，土壤盐分均大幅度减小，通过对暗管不同埋深、不同管径排盐效果的对比，得出暗管排水各土层含盐量的变化规律。不同暗管埋深土壤剖面含盐量随深度的变化趋势见图3。6月8日灌前土壤盐化程度较高，含盐量整体大于20 g kg^{-1}（盐土水平）。表层盐分出现积聚，均大于38.04 g kg^{-1}，在0～40 cm盐分相对集中，从40 cm深度开始盐分逐渐降低。1.4 m埋深暗管由于地势低且靠近明沟，其在0～140 cm土层的盐分含量均大于1.0、0.6 m埋深，受明沟地下水位影响，在140～200 cm土层深度盐分出现降低。灌后各埋深土壤含盐量均大幅度减少，其中0.6 m埋深土壤含盐量降值最大，平均各层土壤含盐量与灌前6月8日未铺暗管对照相比降低7.96 g kg^{-1}，浅层盐分在滴灌水动力驱动下迁移，并通过暗管排出土体，体现“盐随水走”的特征。不同埋深的暗管总体排盐效果呈现CK < 1.4 m < 1.0 m < 0.6 m。非排水期间（6月17日—9月8日）砂砾空隙以及暗管中不存在多余水流，此空间的存在使周围局部土壤中水分不同程度上向此处迁移，导致浅层（0～60 cm）土壤盐分出现小幅度返盐现象。第二次灌水后，垂直方向上不同深度脱盐效果相差较大：0～60 cm土层脱盐程度较高，其中90 mm管径0.6 m埋深土层平均含盐量由第一次（6月8日）灌水前的27.96 g kg^{-1}降至5.42 g kg^{-1}，土体得到最大程度的冲刷；60～100 cm土层位于暗管下方，部分土壤仍处于重度盐化水平（10～20 g kg^{-1}），降幅较小。由此可见，100 cm以上土层含盐量不同程度的减少，这说明在滴灌淋洗条件下，绝大部分盐分会通过暗管排出土体，土壤浅层盐分明显降低对改善新疆盐渍土有重要意义。100 cm以下土层含盐量在20～22 g kg^{-1}范围内。未铺暗管对照区CK土壤含盐量较大，浅层土壤盐分波动幅度较小，由于对照区CK西、北两侧被灌溉水渠环绕，水渠附近土壤中低矿化度的重力水通过孔隙长期侵入周边土体中。有时因为土壤黏紧，重力水无法通过排水沟排出，暂时滞留在土壤的大孔隙中并形成高矿化度的

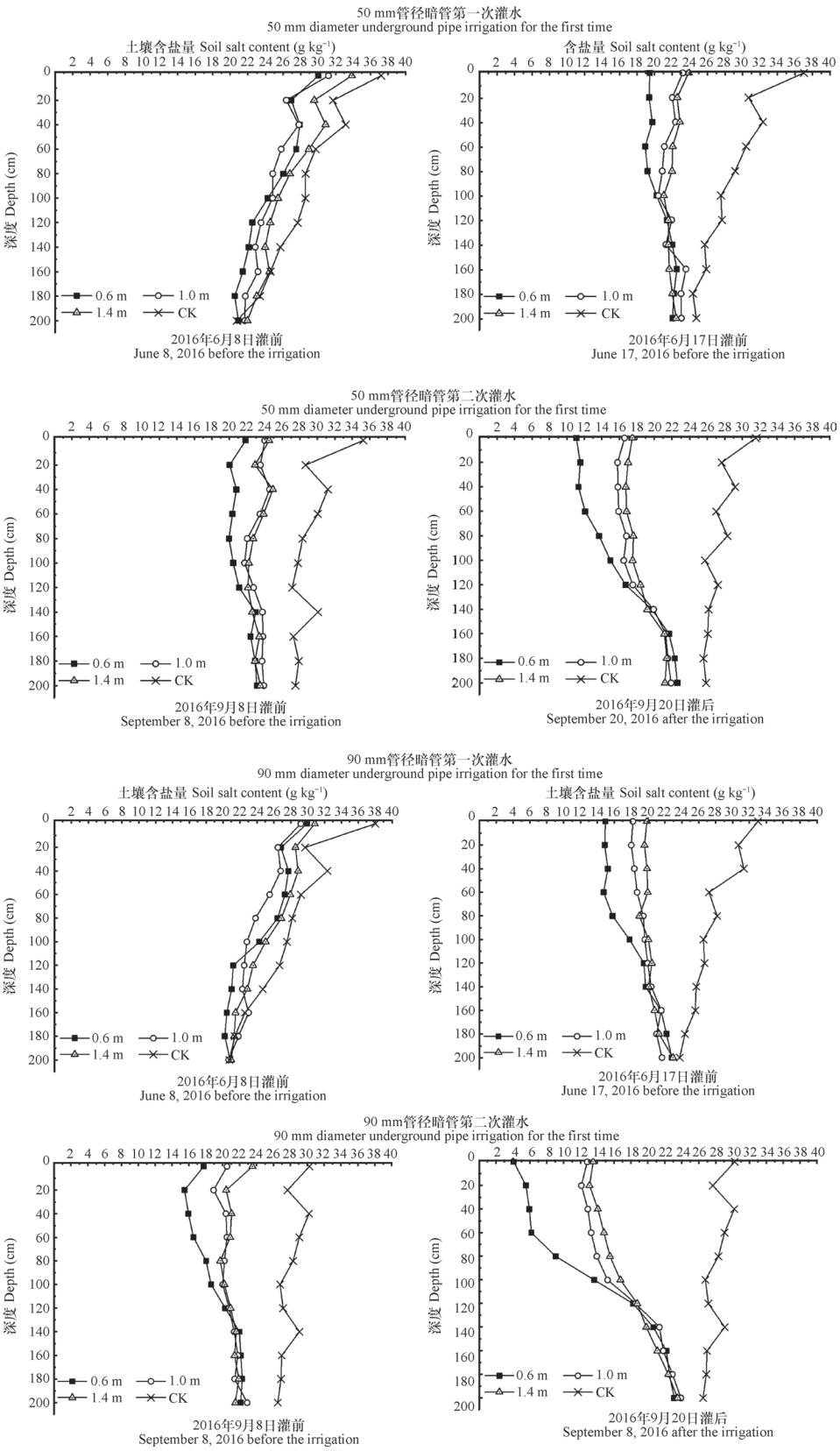

图3　暗管不同埋深土壤盐分剖面分布

Fig. 3　Distribution of soil salt in profile relative to buried depth of the underground pipes

上层滞水，被水渠附近作物及杂草吸收，一定程度上起到了降低土壤盐分的作用。大部分时间由于重力水的不断补给使得其在土壤中滞留时间较长无法排除，并占据了土壤孔隙，不仅阻碍土壤空气的供应，而且对高等植物根的吸水有不利影响。

比较图3数据看出，暗管管径为50 mm时，试验区两次灌水后各土层含盐量变化趋势与90 mm暗管管径相近。距离暗管埋设6个月的时间内，试验各土层（0～200 cm）含盐量随时间推移逐渐减小，1.0 m和1.4 m埋深间已无显著差异，说明在50 mm管径时，增加暗管埋深至1.4 m对暗管的降盐效果无显著影响。

2.2 暗管管径对土壤平均含盐量变化的影响

图4为暗管不同管径土壤盐分剖面分布图。第一次灌水前，2种管径同一埋深不同土层土壤含盐量差异较小，均处于24～34 g kg^{-1}之间。对2次灌水后不同埋深以上位置的土层进行分析（图4），暗管在3种埋深的土壤含盐量差异明显：首先，2种管径在暗管不同埋深均呈现上层土壤盐分差值高于下层土壤，随土层深度的增加差值逐渐减小，说明上层土壤导水性能优于下层土壤；其次，50 mm管径各土层含盐量均高于90 mm管径，50 mm管径在各观测点平均含盐量累积降低11.92 g kg^{-1}，90 mm管径累积降低15.51 g kg^{-1}，为50 mm管径的1.31倍，90 mm管径降盐效果更好；未铺暗管CK经过2次灌水后土壤整体仍呈现积盐趋势，浅层盐分较高，且各土层土壤盐分均大于铺设暗管的小区，这说明首年滴灌条件下暗管排水的应用使暗管上方各土层的土壤盐分得到不同程度的降低。

图5为暗管不同管径对土壤含盐量的影响。以图5a为例，在4—5月试验地经历深翻晒地扰动，且新疆处于春季，降雨相对其他月份较少，土壤盐分亦在动态变化。5—6月进入夏季，强降雨及灌水使土壤盐分下降明显，暗管在0.6 m埋深处从5月5日到至第一次灌水后6月17日，50、90 mm管径土层含盐量均降低6 g kg^{-1}以上，相对未铺暗管对照区平均含盐量减少9.25 g kg^{-1}。7—8月田间未进行灌水，蒸发强且降雨较5—6月少，平均含盐量略有回升，9月20日经过第二次灌水淋洗后，90 mm管径土壤总体盐分降低10.41 g kg^{-1}，降幅最大。4—9月

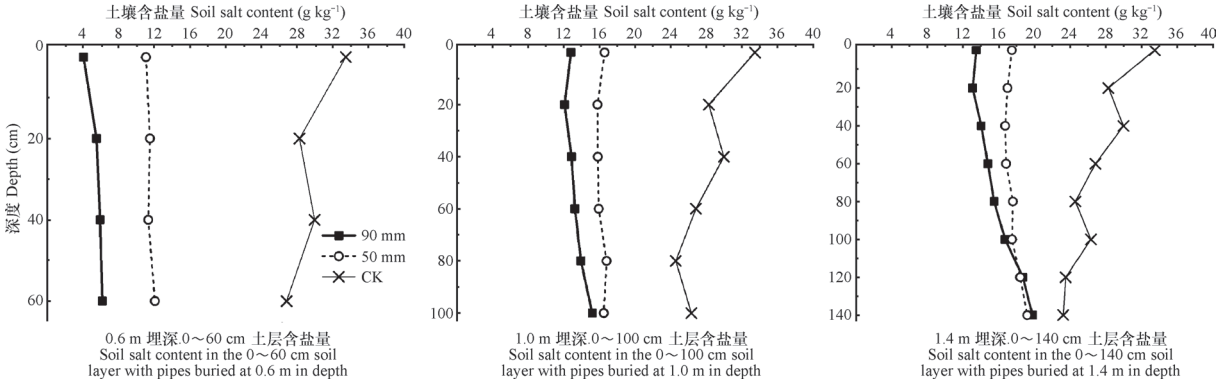

图4 暗管不同管径土壤盐分剖面分布

Fig. 4 Distribution of soil salt in profile relative to diameter of the underground pipes

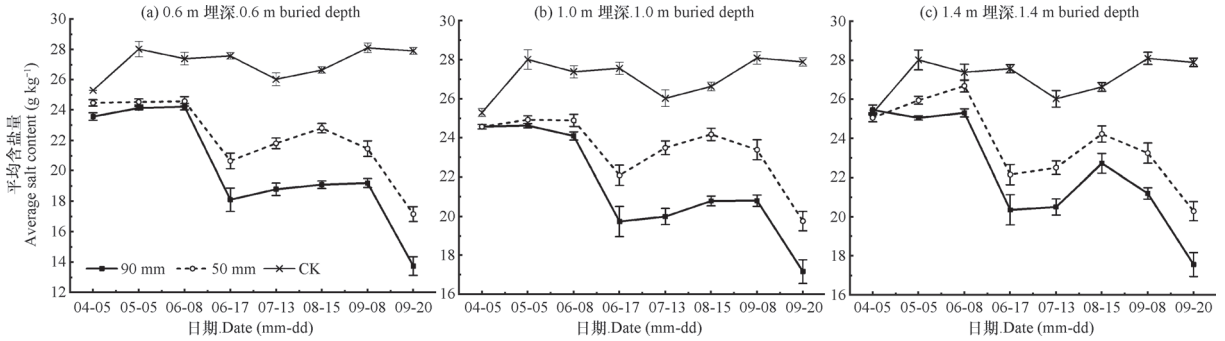

图5 不同埋深及不同管径排水暗管下土壤含盐量的变化

Fig. 5 Soil salt content in the experiment field relative to depth and diameter of the underground pipes

平均含盐量呈现9月 < 6月 < 7月 < 8月 < 4月 < 5月的趋势。

从图5还能看出，从4—9月土壤平均含盐量呈现灌水时降低明显，不灌水时回升的特点，不同管径平均含盐量呈现90 mm < 50 mm < CK的趋势，说明土壤平均含盐量随暗管管径的减小而逐渐减小。

2.3　暗管排水对土壤脱盐效果的影响

暗管排水对脱盐率的影响，见表2，由于1.4 m埋深下土壤盐分无明显降低，所以各观测点只对1.4 m以上土层在暗管不同埋深脱盐率进行分析。暗管不同埋深处脱盐效果随管径和灌水次数不同有明显差别：第一次灌水50 mm管径在0.6、1.0、1.4 m埋深处含盐量均有所减少，其中0.6 m埋深处脱盐率最高为18.84%，1.0、1.4m埋深脱盐率差异不大，分别为13.02%、16.98%，CK的脱盐率为-2.36%，负值表示盐分略有增加；90 mm管径在0.6 m埋深处脱盐率仍高于1.0和1.4 m埋深。第二次灌水后，除暗管在1.4 m埋深处以外，在0.6和1.0 m脱盐效果明显高于首次灌水，以90 mm管径为例，在0.6和1.0 m埋深处第二次灌水分别较第一次灌水脱盐率高10.89、2.71 g kg^{-1}，脱盐率呈现CK < 1.4 m < 1.0 m < 0.6 m。

比较表3数据还能看出，在同一埋深处暗管不同管径之间的差异较大，以0.6 m管径为例，两次灌水，90 mm管径在各埋深处脱盐率均大于50 mm，在0.6 m埋深处土壤平均脱盐率最大，为57.04%。两次灌水平均脱盐率呈现CK < 50 mm < 90 mm。综上，暗管在0.6 m埋深处排盐效果优于1.0 m、1.4 m埋深，暗管埋深越小，土壤总体脱盐效果越好；土壤平均脱盐率随暗管管径的减小而逐渐减小，90 mm管径相比50 mm管径暗管排盐优势更加明显。

3　讨　论

3.1　暗管不同埋深及管径对土壤脱盐效果的影响

通过2次灌水，分析大定额滴灌压盐时期暗管排水不同埋深、管径对土壤盐分剖面分布的影响、以及不同处理间土壤脱盐效果，针对新疆膜下滴灌棉田地下水埋深较大这一特点，且采用漫灌时暗管排水无法有效排出根系层中的土壤盐分，本试验在原有滴灌管网条件下铺设排水暗管改良盐碱土，极大程度降低土壤盐分，使浅层（0～60 cm）土壤含盐量降至12 g kg^{-1}以下中度

表2　暗管排水对土壤脱盐率的影响

Table 2　Effect of the underground drainage pipes on desalination rate of the soils

管径 Pipe diameter（mm）	埋深 Buried depth（m）	第一次灌水土壤含盐量 Soil salt content after the 1st round of drip irrigation（g kg^{-1}）			第二次灌水土壤含盐量 Soil salt content after the 2nd round of drip irrigation（g kg^{-1}）			平均脱盐率 Mean desalinization rate（%）
		灌前 Before irrigation	灌后 After irrigation	脱盐率 Desalinization rate（%）	灌前 Before irrigation	灌后 After irrigation	脱盐率 Desalting rate（%）	
50 mm	0.6	24.57 ± 2.47b	20.04 ± 1.11d	18.44	21.44 ± 1.35c	17.15 ± 2.29bc	20.01	30.20
	1.0	24.89 ± 2.45b	21.65 ± 0.90bc	13.02	23.38 ± 0.99b	19.74 ± 1.61b	15.57	20.69
	1.4	26.68 ± 2.59ab	22.15 ± 0.93b	16.98	23.24 ± 1.07b	20.28 ± 1.37b	12.74	23.99
90 mm	0.6	24.21 ± 2.96b	16.57 ± 2.12e	31.56	18.07 ± 2.21d	10.40 ± 6.32d	42.45	57.04
	1.0	24.93 ± 3.01b	19.08 ± 0.87d	23.47	20.32 ± 0.70c	15.00 ± 3.27c	26.18	39.83
	1.4	26.83 ± 3.23ab	20.35 ± 0.86cd	24.15	21.19 ± 1.14c	17.55 ± 2.88bc	17.18	34.59
CK		28.31 ± 1.35a	28.86 ± 2.51a	-2.36	28.26 ± 2.40a	27.81 ± 1.84a	1.57	-0.18

注：0.6 m埋深土壤平均含盐量=0～200 cm 土层土壤含盐量/11；0.6 m埋深土壤平均脱盐率=（淋洗前0.6m埋深土体土壤平均含盐量-淋洗后0.6m埋深土体土壤平均含盐量）/淋洗前0.6m埋深土体土壤平均含盐量×100%Note：Mean soil salt content with pipes at 0.6 m in depth = Soil salt content of 0～200 cm soil layer/ 11；Mean soil desalination rate with pipes at 0.6 m in depth =（Mean soil salt content with pipes at 0.6 m in depth before leaching − Mean soil salt content with pipes at 0.6 m depth after leaching）/Mean soil salt content with pipes at 0.6 m depth before leaching × 100%

盐化水平，暗管排水阶段性改良效果明显。上文分析仅局限于暗管各埋深之间、各管径之间对土壤盐分的影响，未对试验中不同暗管埋深及管径排盐效果差异性产生的原因进行探讨。张金龙等[22]研究得出暗管经历3次漫灌淋洗后0～1 m深土体土壤脱盐率在56.54%～78.78%之间，本试验经过两次滴灌淋洗，0～1.4 m土层土壤脱盐率介于20.69%～57.04%，由于深层土壤脱盐效果较差，故小于其研究结果。张洁等[23]研究表明暗管排水下脱盐率随土层深度的增加而降低，本试验结果脱盐率呈现CK＜1.4 m＜1.0 m＜0.6 m。与其结论一致，接近各暗管上方的土壤，由于其排水性能更佳，所以此处土层脱盐率应更高。Ritzema等[24]研究表明，在一季作物期间内，使用暗管排水可以使土壤含盐量降低50%，Ghumman等[25]认为土壤含盐量可以降低17%左右；本研究4—9月土壤最大脱盐率为57.04%，脱盐率大于前两者。牛丽霞等[26]认为，为了同时排渍和控盐，适宜黄河河口地区的暗管最小设计埋深为1.2 m，与本文研究得出的最适宜暗管埋深0.6 m结论不同。试验区气候干燥，土壤偏碱性，地势不平，暗管启动施工前种植小麦、油葵等耐盐作物均不能正常生长，出苗率低于40%，弃耕年限较长，这是由于长期自然条件恶劣，加上不合理的灌溉方式导致的。在两次灌水试验中，由于土壤剖面垂直方向上大孔隙及裂隙的存在，灌水后田间各土层可能存在局部的优先流，因此，田间不同土层的盐分运移理论上通常是极度不一致的，但总体运移效果极显著，对土壤剖面盐分分布特征有着直接的影响。

3.2 最佳脱盐效果的暗管埋深和管径

对暗管不同埋深及管径各土层土壤盐分进行差异性分析、回归分析，具体数据见表3。由于本文

表3 暗管不同埋深及管径对土壤盐分差异性及回归分析

Table 3 Variance analysis and regression analysis of soil salt in the soil layers relative to buried depth and diameter of the pipes

	主集 Main set	子集 Subset		均值差 Mean difference	显著性 Statistical significance	95% 置信区间 95% Confidence interval 下限 Lower limit	上限 Upper limit
差异性分析 Differential analysis	管径 Pipe diameter	埋深Buried depth					
	50 mm	0.6 m	1.0 m	−2.96948*	0.087	−6.3866	0.448
			1.4 m	−3.70833*	0.034	−7.125	−0.291
		1.0 m	1.4 m	−0.73885	0.665	−4.156	2.678
	90 mm	0.6 m	1.0 m	−4.60190*	0.010	−8.019	−1.185
			1.4 m	−5.36039*	0.003	−8.778	−1.943
		1.0 m	1.4 m	−0.75849	0.656	−4.176	2.659
	埋深 Buried depth	管径Pipe diameter					
	0.6 m			3.48534*	0.046	0.068	6.902
	1.0 m	90 mm	50 mm	1.85291	0.280	−1.564	5.270
	1.4 m			1.83327	0.285	−1.584	5.250

	变量 Variable	非标准化系数 Unstandardized coefficients	标准误差 Standard error	标准系数 Standardized coefficients	t值 t value	Sig.值 Sig. value
回归分析 Regression analysis	管径Pipe diameter（X1）	−0.060	0.024	−0.303	−2.452	0.018
	埋深Buried depth（X2）	5.668	1.493	0.469	3.797	0.000
	（常数项）Constant term	13.43	2.319		5.792	0.000
	回归方程Regression equation $Y=-0.303X_1+0.469X_2+13.43$					

注：*. 均值差的显著性水平为 0.1 Note：*.Significance level of mean difference at 0.1

样本量较少，为了较好地说明研究结果，本文选取 $p<0.1$ 作为显著水平。从表3数据可以看出，1.0 m和1.4 m埋深之间、1.0、1.4 m不同管径之间四种对比情况下不具备显著差异性之外，其余埋深、管径子集间差异性显著（$p<0.1$），这说明试验区铺设1.0 m和1.4 m埋深不同管径暗管对土壤的排盐效果差异较小，为达到较高的脱盐率暗管埋深应选择0.6 m。从二者标准系数以及显著性水平的值可以推出，暗管埋深对土壤盐分的影响相比与管径更为明显，进而推出暗管不同埋深土壤脱盐效果与管径相比差异性更加显著。

暗管排水改良盐碱地的效果受灌水量、淋洗次数的影响，灌水量小达不到脱盐目的。灌水量过大，暗管排水不均匀，易产生地表积水，灌后返盐严重，也达不到改良的目的，因此要设计合理的灌水周期及灌水量。长期应用暗管排水能将土壤盐分达到脱盐状态，但由于其具有周期性，短时间内无法达到改良目的。针对不同程度的盐渍化农田，如何合理设计灌水量及淋洗措施等各项技术参数，达到更为有效的降盐效果，还有待进一步研究。

4　结　论

不同暗管埋深对土壤盐分影响显著，不同土层脱盐效果相差较大。土壤平均脱盐率随暗管管径的减小而逐渐减小，为了保证滴灌条件下暗管排盐效果，并在实际工程中提高盐碱土改良效果，应在已知管径可选范围的情况下选择管径大的暗管。暗管在90 mm管径、0.6 m埋深时，滴灌淋洗时土壤脱盐率差异最大，0～60 cm土层含盐量已降至轻度盐化水平（3～6 g kg^{-1}），是适宜北疆盐渍土的暗管排水最优埋深与管径布设参数。这对改良土壤盐害具有重要意义，今后还应在暗管设计中多采用浅埋深暗管，研究土壤剖面年际内盐分、浅层地下水位的变化，配合长期灌水，达到暗管排水改良土壤盐分的目的。

参 考 文 献

［1］ 李文昊，王振华，郑旭荣，等. 新疆绿洲盐碱地滴灌条件下地下水局部动态对荒地盐分的影响. 干旱区研究，2016，33（5）：1110—1118
Li W H，Wang Z H，Zheng X R，et al. The influence of groundwater local dynamic on the salt of wasteland under the conditions of drip irrigation in the Xinjiang Oasis（In Chinese）. Arid Zone Research，2016，33（5）：1110—1118

［2］ 吕真真，刘广明，杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究. 土壤学报，2013，50（2）：289—295
Lü Z Z，Liu G M，Yang J S. Soil salinity characteristics of Manas River Valley in Xinjiang（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2013，50（2）：289—295

［3］ 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. 农业机械学报，2014，45（8）：149—159
Wang Z H，Yang P L，Zheng X R，et al. Soil salt dynamics in cotton fields with mulched drip irrigation under the existing irrigation system in Xinjiang（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2014，45（8）：149—159

［4］ 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. 农业工程学报，2014，30（16）：84—90
Liu Y G，Yang H C，Wang K Y，et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2014，30（16）：84—90

［5］ 陈永宝，胡顺军，罗毅，等. 新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系. 土壤学报，2014，51（1）：75—81
Chen Y B，Hu S J，Luo Y，et al. Relationship between salt accumulation in topsoil of deserted land and groundwater in areas with shallow groundwater table in Kashi，Xinjiang（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2014，51（1）：75—81

［6］ 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. 农业工程学报，2011，27（7）：18—22
Mu H C，Hudan T，Su L T，et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2011，27（7）：18—22

［7］ 宋楠，杨思存，刘学录，等. 不同种植年限盐碱荒地土壤盐分离子分布特征. 土壤学报，2014，51（3）：660—665
Song N，Yang S C，Liu X L，et al. Distribution characteristics of soil salt ions in saline land relative to cultivation history（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2014，51（3）：660—665

［8］ 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. 农业工程学报，2011，12：90—95

Yang P N, Dong X G, Liu L, et al. The salt migration and regulation of soil salt in the daguan area of the dry land area (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 12: 90—95

[9] 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. 水利学报，2016（4）：537—544
Li X W, Zuo Q, Shi J C, et al. The numerical simulation and analysis of the salt in the dark tube of cotton field under the Xinjiang filmⅠ: Model and parameter validation (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2016 (4): 537—544

[10] 张兰亭. 暗管排水改良滨海盐土的效果及其适宜条件. 土壤学报，1988，25（4）：356—365
Zhang L T. Effects and condition of the underground drainage for improving saline soil of coastal region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25 (4): 356—365

[11] 于淑会，刘金铜，李志祥，等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展. 中国生态农业学报，2012，20（12）：1664—1672
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 (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20 (12): 1664—1672

[12] 王少丽，王修贵，丁昆仑，等. 中国的农田排水技术进展与研究展望. 灌溉排水学报，2008（1）：108—111
Wang S L, Wang X G, Ding K L, et al. The progress of China's farmland drainage technology and its research prospects (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2008 (1): 108—111

[13] 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. 水利学报，2016（5）：616—625
Li X W, Zuo Q, Shi J C, et al. The numerical simulation and analysis of the salt in the dark tube of cotton field under the Xinjiang filmⅡ: Model application (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2016 (5): 616—625

[14] 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. 中国农村水利水电，2015（2）：99—104
Zhu H B, Yu S E, Wang J. The model and parameters verify the experimental study of the effect of drainage and drainage in the water and rainfall conditions of the new reclamation areas on the coast (In Chinese). China Rural Water and Hydropower, 2015 (2): 99—104

[15] 李从娟，李彦，马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. 土壤学报，2011，48（2）：302—310
Li C J, Li Y, Ma J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut Desert (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (2): 302—310

[16] 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. 灌溉排水学报，2014（3）：38—41
Chen Y, Zhang Z Y, Feng G X, et al. The experimental study on the effect of desalination of saline in the coastal saline (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2014 (3): 38—41

[17] 许林书，姜明. 莫莫格保护区湿地土壤均化洪水效益研究. 土壤学报，2005，42（1）：159—162
Xu L S, Jiang M. Flood moderating benefit of wetland soil in momoge nature reserve. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42 (1): 159—162

[18] 杨红梅，徐海量，牛俊勇. 干旱区滴灌条件下防护林次生盐渍化土壤水盐运移规律研究. 土壤学报，2010，47（5）：1023—1027
Yang H M, Xu H L, Niu J Y. Soil water and salt transport in secondary salinized soil under shelterbelt using drip irrigation in arid zonet (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (5): 1023—1027

[19] 张秀英. 第二讲：新疆盐碱土类型和性质. 新疆农垦科技，1983（2）：70—72
Zhang X Y. Lecture 2: Xinjiang saline soil type and nature (In Chinese). Science and Technology of Farmland Reclamation in Xinjiang, 1983 (2): 70—72

[20] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量. 中国新技术新产品，2014（9）：184
Yuan N N. The indoor ring tool is used to determine the amount of water in the soil (In Chinese). China's New Technology Products, 2014 (9): 184

[21] 王红旗，刘新会，李国学. 土壤环境学. 北京：高等教育出版社，2007
Wang H Q, Liu X H, Li G X. Soil environmental science (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2007

[22] 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. 农业工程学报，2012（9）：85—89
Zhang J L, Zhang Q, Wang Z Y. The effect of the spacing of the drainage tube on the effect of the salt removal of the sea salt (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012 (9): 85—89

[23] 张洁，常婷婷，邵孝侯. 暗管排水对大棚土壤次生盐

渍化改良及番茄产量的影响. 农业工程学报，2012（3）：81—86
Zhang J，Chang T T，Shao X H，The effect of drainage on the soil secondary salinization and the production of tomatoes was also studied（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2012（3）：81—86
[24] Ritzema H P，Satyanarayana TV，Raman S，et al. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India：Lessons learned in farmers'fields. Agricultural Water Management，2008，95（3）：179—189
[25] Ghumman A R，Ghazaw Y M，Niazi M F，et al. Impact assessment of subsurface drainage on waterlogged and saline lands. Environmental Monitoring & Assessment，2011，172（1/4）：189
[26] 牛丽霞，蔡强，薛菲. 黄河河口地区暗管排碱施工暗管埋深计算分析. 水利建设与管理，2014，12：77—79
Niu L X，Cai Q，Xue F. In the Yellow River estuary，the dark tube is buried deep in the dark tube（In Chinese）. Water Conservancy Construction and Management，2014，12：77—79

Impacts of Diameter and Depth of Drainage Pipes in Fields under Drip Irrigation on Soil Salt

HENG Tong[1]　WANG Zhenhua[1†]　LI Wenhao[2]　ZHANG Jinzhu[2]　YANG Binlin[1]
（1 *College of Water and Architectural Engineering*，*Shihezi University*，*Shihezi*，*Xinjiang* 832000，*China*）
（2 *Key Laboratoryof Water-Saving Irrigationof Xinjiang Productionand Construction Group*，*Shihezi University*，*Shihezi*，*Xinjiang* 832000，*China*）

Abstract　【Objective】To find a water efficient technique using underground drainage pipes to wash off soil salt is an issue that has aroused attention from scientists all over the world，because such a technique would make great valuable contribution to agricultural production and economic returns，especially in regions that have large areas of saline alkali soils. 【Method】 In this paper，a field experiment was conducted with drainage pipes，50 mm or 90 mm in diameters，buried 0.6 m，1.0 m or 1.4 m deep in the field under drip irrigation to explore effect of the usage of drainage pipes on soil salinity，relative to diameter and burial depth of the pipe. 【Result】 The experiment shows that desalinization effect of two rounds of drip irrigation varied from soil layer to soil layer. The effect was the highest in the 0～60 cm soil layer，lowering the soil salt content down below 12 g kg^{-1} or to the moderate salinization level，but the effect was not significant in the soil layers below 100 cm. Drainage pipes buried at 0.6 m in depth were higher than those 1.0 and 1～4 m in depth in desalination effect，reducing soil salt content by 14.34 g kg^{-1} in total，or by 13.32 g kg^{-1} as compared with CK，field without using drainage pipes Pipes buried at 1.4 m had no significant effect on soil desalinization. The pipes different in diameter varied in desalinization effect. Pipes 90 mm in diameter were much higher than those 50 mm. The effect of pipes 50 and 90 mm in diameter varied with burial depth，being in the range of 20.69%～30.20% and 34.59%～57.04%，respectively. 【Conclusion】In the fields with drainage pipes 90 mm in diameter buried 0.6 m in depth，two rounds of drip irrigation reduced soil salinization in the 0～60 cm soil layer to the mild salinization level（3～6 g kg^{-1}），indicating that the technique is high in desalinization efficiency and applicable to the regions of salt-affected soils in Xinjiang. And the findings in this paper may serve as scientific basis for choice of diameter and burial depth of drainage pipes in application of the technique.

Key words　Drip irrigation；Dark tube drainage；Saline soils；Designed parameters；Desalination rate

（责任编辑：檀满枝）