

# 水平定向钻进铺管技术在盐碱地改良中的应用

何计彬<sup>1,2</sup>, 潘德元<sup>1,2</sup>, 李炳平<sup>1,2</sup>, 叶成明<sup>1,2</sup>, 范孔岳<sup>3</sup>

(1. 国土资源部地质环境监测技术重点实验室, 河北保定 071051; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**土壤盐碱化作为一种渐进性环境地质灾害,已严重制约着人类生活与社会经济的发展,对盐碱地实施改良和微咸水开发利用已成为世界关注的热点。以往的盐碱地改良多用明渠、暗管排水、暗管结合大口径竖井抽排、种植耐碱性植物等方法,明渠及埋设暗管对地表的开挖破坏性极大,且排水量及适用深度有限,植物改良存在周期长、费时费力等诸多缺点。水平定向钻进铺管技术可将滤水管以水平或近似水平安装在含水层中(水平井),可垂直于含水层流向长距离铺设,与传统改良方式相比能获得较大的出水量、成本低、且施工对环境影响小等诸多优势,工程实例证明,该施工工艺技术为盐碱地改良、地下咸水开发利用、浅层低渗透性地下水资源开采等提供了较理想的工艺方法。

**关键词:**水平定向钻进;滤水管;盐碱地改良;土壤污染修复

中图分类号:P634.7 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2016)10-0139-06

**Application of HDD Pipelaying Technique in Saline Soil Improvement/HE Ji-bin<sup>1,2</sup>, PAN De-yuan<sup>1,2</sup>, LI Bing-ping<sup>1,2</sup>, YE Cheng-ming<sup>1,2</sup>, FAN Kong-yue<sup>3</sup>** (1. Key Laboratory for Geological Environmental Monitoring Technology of the Ministry of Land and Resources, Baoding Hebei 071051, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding Hebei 071051, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** As a gradual environmental geological disaster, soil salinization severely restricts the human life and the development of social economy, the improvement of saline alkali soil and the development & utilization of brackish water have become the hotspot in the world. Open channel, subsurface drainage and subsurface drainage combined with large diameter vertical shaft and alkali resistant plant were used for saline alkali soil improvement, but open channel and buried underground pipe have great damage to ground surface with disadvantages of limited water displacement and applicable depth, long plant improvement cycle and being time-consuming. By horizontal directional drilling (HDD), screen pipe can be horizontally or nearly horizontally installed in the aquifer and be laid perpendicular to the aquifer flow in a long distance. Compared with the conventional tube well drilling, there are advantages of larger water yield, low cost and small impact on the environment. The engineering example proves that this construction technology is ideal for saline alkali soil improvement, development & utilization of saline groundwater, exploitation of low permeability shallow groundwater resources and so on.

**Key words:** HDD; screen pipe; saline-alkaline soil amelioration; soil pollution remediation

## 0 引言

土壤盐碱化是一种渐进性环境地质灾害,土壤在自然和人为因素作用下富集盐、碱含量达到抑制农作物正常生长的水平,危害农作物生长,并加剧生态环境恶化的现象<sup>[1]</sup>。盐碱地土壤理化性状差,植物生长不良甚至不能成活,难以建立植被,严重制约了农业生产和农林绿化,影响了生态环境<sup>[2-3]</sup>。据估计,全球盐碱地面积已达 $1.0 \times 10^{13} \text{ hm}^2$ ,占陆地面积的25%,主要集中在欧洲亚洲大陆地区、非洲

西部地区以及美洲西部地区,并且土地盐碱化以每年 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度在增长<sup>[4]</sup>;我国的盐碱地面积约为 $6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,分布较广,从东海之滨到南北边陲,从黄河流域到松辽平原,不同类型的盐碱土壤均有分布(图1所示)<sup>[5]</sup>,面积约 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,我国每年因盐碱化废弃的土地达 $2.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (图2所示),导致少收粮食207亿kg、损失鲜草1218亿kg<sup>[6]</sup>。近几年,全球土地盐碱化呈现逐步加重的趋势<sup>[7]</sup>,对盐碱地进行开发治理已成为世界关

收稿日期:2016-03-28

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“典型地区地下水开发利用与盐碱地改良关键技术方法示范研究”(编号:12120113103300)

作者简介:何计彬,男,汉族,1984年生,工程师,硕士,从事水文地质钻探工艺及成完井工艺技术方面的研究工作,河北省保定市市七一中路1305号,hejibin123@126.com。

注的重点。



图1 我国不同类型盐碱地分布图

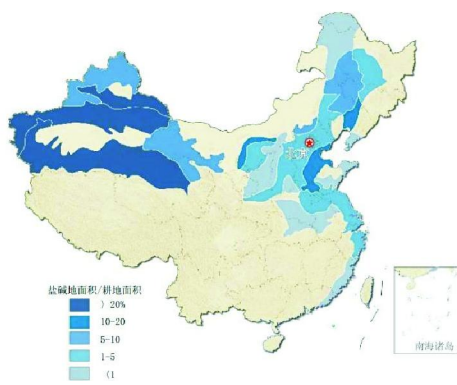


图2 我国现有盐碱地占耕地面积比例示意图

## 1 盐碱地改良技术方法概述

20世纪20年代,一些发达国家对盐碱地的地理分布、形成过程与机理进行了初步研究,30年代采用了以水利排灌、防渗等措施对盐碱地实施改良治理<sup>[8]</sup>,世界各国改良土壤盐碱化的方法主要有以下几种。

(1)客土改良,压沙治盐。此法为世界各国常用的盐碱地治理方法,先在原有土地上铺设一定厚度的沙子,再往上铺一层薄点的有机肥料,再往上铺设一层沙子,然后种植植物,通过减少土体水分的蒸发来减少盐分的聚集,达到遏制土壤的盐碱化的目的。但存在治标不治本的问题。

(2)明渠、暗管、竖井排水脱盐。明渠排水仅仅适用于盐渍较重,地下水位浅,有泄水出路的地区,通过建立排水系统,使土壤脱盐;地下暗管渗流排盐,是在地下1~2 m范围内,铺设渗水管,结合灌溉压水达到洗盐的目的。这些治理方法的缺点是均对地表生态环境破坏较大、不经济、对地层的影响深度

相对较浅,无法改善地下水质的赋存环境,不能实现地下咸淡水更换和地下水资源的再利用,仍存在治标不治本的问题。

(3)引水洗盐和引洪淤灌。主要做法为引导水流冲洗土地,使其中的盐分随水分流失,适合于雨季来临时进行或水资源丰富地带。缺点是浪费较大水资源,若贫水国家不可长期使用且用工量大,治标不治本。

(4)种植耐碱植物和化学改良。通过降低土壤可交换性钠离子含量和土壤溶液pH值,降低土壤碱性,改善盐碱土壤理化性状,调节作物的正常生理机能。其缺点是土地改良周期较长、投入费用较高、费时费力。

综上所述,盐碱地的形成主要发生在干旱、半干旱缺水地区,由于土层内和地下水含有大量的盐分,经地面蒸发和土壤的毛细作用,使土壤失去水分而盐分聚集在地表层造成土地盐碱化;海滨地区,由于存在常驻海水浸渍并伴随着水分蒸发形成了大量盐碱地。总之,盐碱化土地的成因主要与浅层地下咸水有关,由于地下咸水占据着地层的浅部地质空间,阻碍了地层蓄纳降水及地表淡水补给,经日积月累蒸发浓缩,成为土地盐碱化的根源。

因此,研究适用于盐碱地改良的水平井技术,在同一含水层内垂直于含水层流向长距离铺设过滤器,通过增大水井出水量,控制浅层地下水水位位于临界水位以下,腾出浅部地层空间以淡水置换咸水,达到既解决干旱缺水又能对盐碱地改良标本兼治。水平定向钻进铺管成井技术(水平井)与传统的明渠、暗管、竖井等盐碱地改良施工方法相比,具有对生态环境破坏小,施工后地面无沉降、无需毁坏大面积耕地及堆土带来的扬尘和泥泞、不受地下水埋设限制、经济环保等诸多优点,且施工技术已在市政、通讯电力、燃气等管网建设中得到了广泛成熟应用<sup>[9-17]</sup>。由此可见,水平井技术为盐碱地改良、地下咸水合理开发利用、浅层低渗透性地下水资源开采以及土壤污染修复等提供了较理想的工艺方法。

## 2 水平定向钻进技术与成井工艺

水平定向钻进铺管技术主要利用地表钻机、随钻测量仪器以及有关钻具,先按导向孔设计轨迹施工导向孔;再通过对导向孔进行扩孔,根据地层特性一次或分级回扩至与所铺管道相对应的口径,并将

预铺设管线同步或分步拉入。盐碱地治理水平井较传统非开挖铺管相比,具有水平段(过滤器)铺管距离长、埋深大、地层复杂等特点,根据场地条件及用途,水平井可分为水平双面井和水平盲井两种成完井工艺,通常成井深度较浅时设计双面井结构,使用回拖扩孔和铺管施工工艺;当钻孔较深或场地受限时设计盲井结构,采用顶进扩孔和铺管施工工艺。

## 2.1 导向孔轨迹设计

### 2.1.1 导向孔轨迹设计原则

导向孔作为扩孔、管道回拖的母线,其轨迹设计是水平定向钻进铺管的依据和质量检查的标准。导向孔轨迹设计的一般原则是在充分掌握地下地层、管线资料的基础上,以最安全、最经济和最方便的方法完成地下管线的铺设任务。其轨迹设计主要考虑管线埋深、关键节点的地表位置、地下已有管线及障碍物的位置、待铺管线材料类型、出入土角及管线的曲率半径、施工地点的特殊要求、地貌条件的限制等<sup>[10]</sup>。

水平井铺管与其它穿越管线不同,为增加出水量需铺设较长的滤水管,要求其导向孔轨迹要有较长的直线段、较小的误差以及较小的弯曲工艺段,这对导向孔施工提出了更高要求。为了达到这一要求需要采取以下措施:提高造斜强度,缩短弯曲段长度;按照抽水试验要求设计的水平井,管径较大,且普遍采用环保、耐腐蚀的 PVC-U 脆性塑料材质井管,与常规穿越工程使用的小口径 PE 管材相比,其管道安全过孔的曲率半径较大,对导向孔轨迹中的曲线段弯强设计提出了较高要求。为此,开挖相当的入出土工作坑槽,以克服 PVC-U 井管在弯曲应力状态下其抗拉强度减小的难题,综合考虑扩孔钻具顺利扩孔、钻具孔内安全工作、满足管材铺设弯曲强度要求等因素,导向孔轨迹设计如图 3 所示(以河北沧州的一个具体工程为例)。

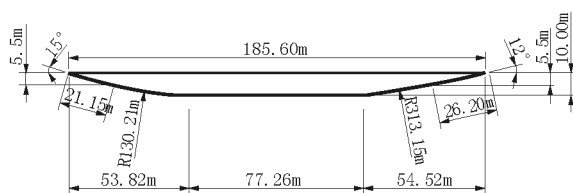


图 3 导向孔轨迹设计图

### 2.1.2 导向孔轨迹设计参数<sup>[16-22]</sup>

#### (1) 弯曲段曲率半径计算

$$R = \max(R_1, R_2, R_3) \quad (1)$$

$$R_1 = L^2 / [2(\sqrt{D_k - D} + \sqrt{D_k - D - t})^2] \quad (2)$$

$$R_2 \geq \frac{Ed}{2\left[\frac{\sigma_{-1} - n_\sigma \psi_\sigma \sigma_m}{n_\sigma K_\sigma / (\varepsilon_\sigma \beta)} - \frac{\pi^2 Efd}{2l^2}\right]} \quad (3)$$

$$R_3 \geq 1000D_3 \quad (4)$$

式中: $R$ ——曲率半径, m;  $R_1$ ——扩孔钻具顺利过孔的曲率半径, m;  $R_2$ ——钻具孔内安全工作的曲率半径, m;  $R_3$ ——管道曲率半径, m;  $D_k$ ——钻孔口径, mm;  $L$ ——扩孔钻具长度, m;  $D$ ——扩孔钻具直径, mm;  $t$ ——确保扩孔钻具组合在弯曲钻孔中顺利运动,其自由通过时的必需孔壁间隙, mm;  $\sigma_{-1}$ ——钻杆材料在对称循环下弯曲的持久极限,  $n_\sigma$ ——钻杆在非对称循环下的工作安全系数;  $\sigma_m$ ——钻杆应力循环中的平均应力, MPa;  $K_\sigma$ ——反映构件外形影响的有效应力集中系数,可查表或由曲线图得到;  $\psi_\sigma$ ——材料对不对称应力循环的敏感系数;  $\varepsilon_\sigma$ ——反映构件尺寸影响的尺寸系数;  $\beta$ ——反映构件表面质量影响的表面质量系数;  $f$ ——钻杆在弯曲钻孔中的挠度, mm;  $d$ ——钻杆直径, mm;  $l$ ——钻杆弯曲的最小半波长度, m, 其数值可由 T. M. 萨尔基索夫公式求解;  $E$ ——管材的弹性模数;  $D_3$ ——管道外径, m。

#### (2) 造斜强度计算:

$$i = 57.3/R \quad (5)$$

式中: $i$ ——造斜强度, ( $^\circ$ )/m。

#### (3) 入土角和造斜长度计算:

$$\alpha = 2\arctan \sqrt{H/(2R - H)} \quad (6)$$

$$L = \alpha/i \quad (7)$$

式中: $\alpha$ ——入土角, ( $^\circ$ );  $L$ ——造斜长度, m;  $H$ ——管道中心距入土点埋设深度, m

## 2.2 导向孔钻进

导向钻头在钻进过程中处于推进或旋转来实现导向孔空间轨迹延伸精度的控制。当导向钻头沿着设计轨迹某个方向推进而不回转时,钻孔方向发生改变,以其沿着设计的钻孔轨迹钻进;导向钻头连续回转时钻出直孔。导向钻头钻进的同时,其内的探棒发出信号,操作人员通过地表导向仪接收的信号确定导向钻头的位置(工具面向角、深度),从而实现人为控制导向孔轨迹,使导向孔按设计轨迹延伸<sup>[10]</sup>。对于水平双面井导向孔钻进:首先按导向孔设计轨迹钻先导孔(图 4),钻具由入土点进入,经地下穿越到出土点钻出;对于水平盲井导向孔钻进:钻具按设计入土角从入土点钻进并造斜到设计深度

后,变为水平钻进并延伸到设计长度后终孔(图5)。

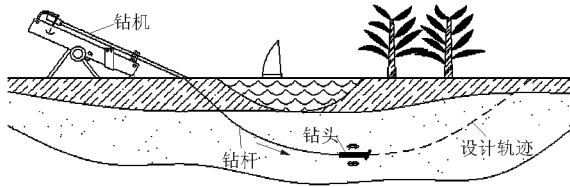


图4 双面井导向孔施工示意图

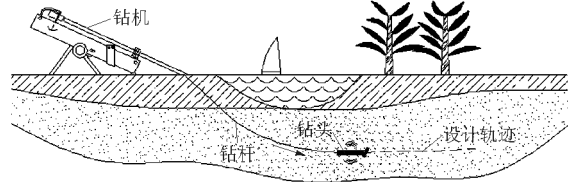


图5 盲井导向孔施工示意图

### 2.3 扩孔

完成导向孔施工后,采用扩孔器扩孔。一般是将导向孔扩大至管道直径的1.2~1.5倍,以便安装成品管线。如所铺管线管径较大,或位置地层情况较复杂,可根据钻机情况进行一次或分级(多次)扩孔,以满足所安装成品管线直径的要求。对于盐碱地治理施工的水平双面井可以通过回拖扩孔;但对于水平盲井只能采用顶进扩孔,为防止扩孔与导向孔轨迹不同轴应在扩孔钻具前端安装一定长度的导向管或使用导向仪跟踪扩孔。

一般最终的扩孔直径采用经验公式:

$$D = KD_0 \quad (8)$$

式中: $K$ ——安全系数; $D_0$ ——成品管道直径。

安全系数的取值应充分考虑所钻地层情况、钻孔清洁度、钻孔的弯曲度、管道的刚度和强度<sup>[11-12]</sup>。对于盐碱地治理施工的水平井所采用的贴砾管(过滤器),在松软地层回扩时安全系数应取大值以免地层过大的挤压使滤水管贴砾层破坏;在完整硬地层回扩时安全系数取小值;成井管材材料特性及弯曲强度要求应考虑钻孔弯曲度对安全系数取值的影响。

### 2.4 井管铺设

与传统非开挖铺设电信、电缆套管不同,盐碱地治理水平井铺管需根据地层进行排管工序:粉土、粘土层铺设井壁管;砂层铺设贴砾管(过滤器)。

水平双面井在扩孔完成后,将按顺序排列并连接成整体的井壁管与过滤器以回拖方式铺管,为防止铺管过程中过滤器贴砾层破坏,需在一定间隔距离的过滤器之间安装护箍(其外径稍大于过滤器外径)。

管道采用一次拉管到位的方法铺设,在回拉铺管

过程中要严密观察拉力情况和出浆情况。回拉过程必须连续进行,中间不允许有长时间的作业停顿,以防止钻孔缩径或塌孔,保证管线能够顺利铺设完成。

水平盲井钻孔结构与双面井不同,因钻孔只有入口,铺管只能使用推管(顶管)铺设井管,如图6所示。为减小井壁对井管的摩擦阻力,铺管时需在井管前端安装悬浮导引管;对于过滤器铺设距离较长的水平盲井,需在一定间隔距离的过滤器之间安装环空悬浮管,以减小井壁下帮对过滤器的摩阻力。

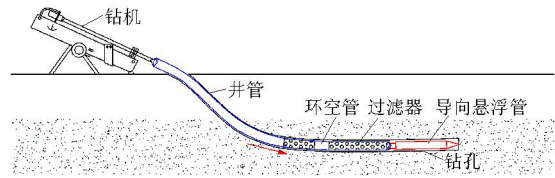


图6 盲井井管安装示意图

回拖阻力计算:将钻孔分为3段(图7) $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ (对应的是井壁管、过滤器、井壁管)。井管在孔内的受力情况比较复杂,假设在理想状况下,整个钻孔通道平滑即拐点平滑过渡,井管本身的柔韧性足以满足井管顺利通过,井管回拖时的受力可通过4个点分析计算。

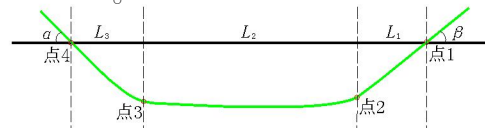


图7 井管在孔内的示意图

(1)井管入孔前产生的回拖力:

$$P_1 = [W_1(L_1 + L_3) + W_2L_2]f_1 + F_0 \quad (9)$$

式中: $P_1$ ——最小铺管启动力(未考虑泥浆的剪切力),N; $W_1$ ——单位长度井壁管重力,N/m; $W_2$ ——单位长度过滤器重力,N/m; $F_0$ ——孔内所有钻具摩擦阻力,N,铺管前试拉钻具获取; $f_1$ ——井管与地面摩擦系数,一般取0.15~0.2。

(2)井管进入孔内时(点2位置、井管内无泥浆)产生的回拖力:

$$P_2 = (W_1L_3 + W_2L_2)f_1 + F_1 + (G_1 - W_1)L_1(f_2 \cos\beta + \sin\beta) + W_{\text{钻}}L_3(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha) + sh\gamma \quad (10)$$

式中: $F_1$ ——水平孔段钻具的摩阻力,按占 $F_0$ 比例取值,N/m; $G_1$ ——单位长度井壁管排开泥浆的重力,N/m; $f_2$ ——孔壁摩擦系数,一般取0.3; $\beta$ ——钻孔出土角,(°); $W_{\text{钻}}$ ——单位长度钻杆重力,N/m; $\alpha$ ——钻孔入土角,(°); $sh\gamma$ ——排出的泥浆重力,

$N$ ;  $s$ ——井管面积,  $m^2$ ;  $h$ ——成井深度,  $m$ ;  $\gamma$ ——泥浆重度,  $t/m^3$ 。

(3) 过滤器全部进入孔内(点3位置、管内充满泥浆)时的回拖力:

$$P_3 = W_1 L_3 f_1 + (W_1 - G_2) L_1 f_2 + (W_2 - G_3) L_2 (f_2 \cos \beta - \sin \beta) + W_{\text{钻}} L_3 (f_2 \cos \alpha + \sin \alpha) + sh\gamma \quad (11)$$

式中:  $G_2$ ——单位长度井管(不含管内体积)排开泥浆的重力,  $N/m$ ;  $G_3$ ——单位长度过滤器(不含管内体积)排开泥浆的重力,  $N/m$ 。

(4) 井管接近地表时的回拖力  $P_4$ : 假设钻孔出土角和入土角度相近,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  孔段产生的铺管摩擦阻力为:

$$P_4 = [(W_2 - G_3) L_2 + (W_1 - G_2) L_1 \cos \alpha + (W_3 - G_2) L_3 \cos \beta] f \quad (12)$$

理论与实践证明, 井管安装阻力主要与钻孔轨迹曲线段的弯强、铺管长度与深度、钻具和井管的重力与体积、及其与地表和孔壁的摩擦系数、泥浆的重度、粘度等特性(为满足后续洗井及抽水试验要求, 施工过程中特别是扩孔阶段对泥浆的失水、粘度变化有较高要求)及钻孔的入土角、出土角等有关, 铺管前应验算各孔段的回拖阻力是否满足井管的力学性能要求, 特别是滤水管(过滤器)在弯曲应力状态下其抗拉强度明显减小。根据场地条件及铺设井管力学特性, 通过上述理论严格计算论证。

### 3 应用效果

在河北沧州“典型地区盐碱地改良关键技术研究应用”项目中, 使用水平定向钻进铺管技术在浅层弱渗透性含水层成功施工了3眼水平双面井与同口径常规竖井。首次在国内将水平定向钻进铺管技术应用在盐碱地治理项目中并取得了成功, 其水平双面井成井结构剖面图、现场井管铺设施工如图8、图9所示。

抽水试验显示, 单一水平井与同口径常规竖井相比, 其水量稳定后, 前者出水量为  $15.7 m^3/h$ 、稳定流态后水位降深为  $7.83 m$ , 后者出水量为  $3.22 m^3/h$ 、稳定流态后水位降深为  $5.7 m$ , 对应的降深曲线如图10所示。水平井四周边界监测井(径向 JC-01、JC-02 与切向 Z2、Z3)降深曲线如图11所示、降水水位等值线如图12所示。综合之前数值模拟定性分析(图13所示), 证明水平井以滤水管为

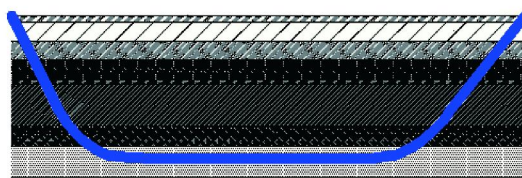
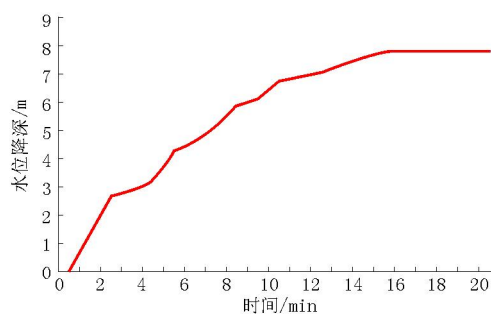


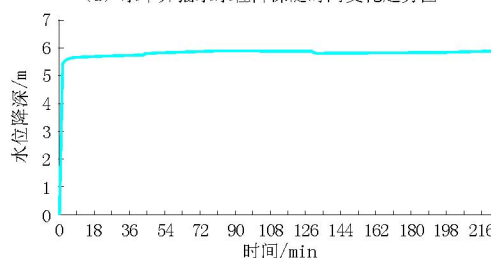
图8 水平双面井成井结构剖面图



图9 井管铺设图



(a) 水平井抽水水位降深随时间变化趋势图



(b) 竖井抽水水位降深随时间变化趋势图

图10 水平井与竖井水位降深随时间变化趋势

半径的区域范围内, 水位下降较快, 水面线与滤水管近似平行且接近滤水管, 滤水管以外降落曲线与竖井相似, 整个降落曲线呈倾斜“盆状”, 水位线降落梯度远小于竖井的“漏斗状”; 水平井降水影响半径近似等于相同管径竖井降水半径与滤水管长度之和, 其降水效率具有明显优势, 且可消除“疏不干”降水难题。

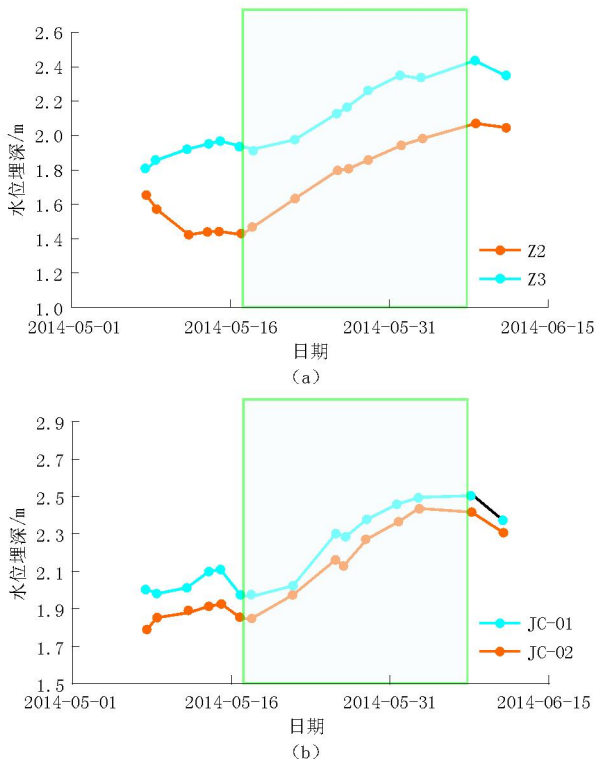


图 11 监测井地下水水位动态监测曲线

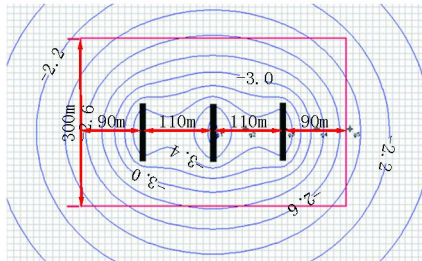


图 12 水平井降水水位等值线分布图

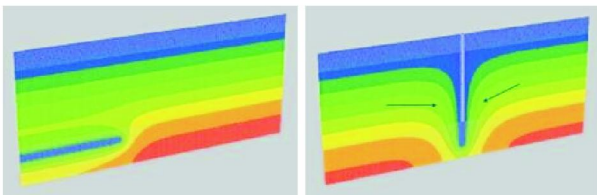


图 13 水平井、竖井降水水位等值线数值模拟

### 4 结语

工程实践表明,水平定向钻进铺管技术在盐碱地改良、地下咸水开发利用、浅层低渗透性地下水资源开采等领域应用与传统管井工艺相比具有单井出水量大、降深影响半径广、综合成本低、且施工对环境影响小等明显优势。

### 参考文献:

- [1] 古洪彪,宋洋,潘杰. 松嫩平原盐碱化形成影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学,2010,38(30),16895-16898.
- [2] 王文成,郭艳超,李克晔,等. 盐胁迫对竹柳种苗形态及生理指标的影响[J]. 华北农学报,2011,26(S1):143-146.
- [3] 王春娜,宫伟光. 盐碱地改良的研究进展[J]. 防护林科技,2004,(5):38-41.
- [4] Kovda VA. Loss of productive land due to salinization[J]. Ambio, 1983,14(2):91-93.
- [5] 阿依帕夏·阿不都克力木. 土壤盐碱化——新疆社会发展面临的环境问题[J]. 和田师范专科学校学报(汉文综合版),2008,28(3),193-194.
- [6] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报,2002,33(6):449-455.
- [7] 张建锋,宋玉民,邢尚军,等. 盐碱地改良利用与造林技术[J]. 东北林业大学学报,2002,30(6),124-29.
- [8] 江华. 新疆盐渍土成因分析及盐渍土路基病害处理[J]. 路基工程,2008,(4):215-216.
- [9] 李山. 地下管线非开挖施工技术[Z]. 四川成都:成都理工大学,2007.
- [10] 中国非开挖技术协会. 水平定向钻进管线铺设工程技术规范[S]. 2002.
- [11] 熊勃,隆威. 某通信工程中的非开挖水平定向钻进技术应用探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘技术与工程),2005,32(12):30-32.
- [12] 杜利猛,石浩,等. 水平定向钻进技术在胡底煤矿地质构造勘探中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘技术与工程),2014,41(6):38-43.
- [13] Li Shang. Expansion for the structure design discusses[J]. The Trenchless Technology,2012,4(2):19-25.
- [14] 朱文鉴,张雅春,张培丰,等. 非开挖技术在其它领域中的应用[J]. 非开挖技术,2007,2(3).
- [15] 王银献,江源. 非开挖技术在城市隧道施工中的应用[J]. 非开挖技术,2005(5).
- [16] 何计彬,等. 水平定向钻进曲线段造斜强度分析[J]. 地下空间与工程学报,2014(12).
- [17] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
- [18] 李子丰. 油气井杆管柱力学[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [19] 吴光琳. 定向钻进工艺原理[M]. 四川成都:成都科技大学出版社,1991.
- [20] 李山. 水平定向钻进地层适应性的评价方法[J]. 非开挖技术,2008,(1):39-44.
- [21] 李山. 水平定向钻进中的几个重要技术问题[J]. 非开挖技术,2006,(1):1-6.
- [22] 李山,等. 水平定向钻进铺管孔管直径比设计取值方法[J]. 非开挖技术,2010,(1).