文章编号:1000-7601(2025)05-0212-12 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.21

# 明沟和暗管排水控盐效果及暗管失效后返盐规律研究

冶福海,刘洪光,汤 骅,李 玲,龚 萍,李鹏飞

(石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000)

**摘 要**:为探究明沟和暗管在长期排水控盐效果方面的差异及暗管失效后土壤盐分空间迁移特征,于 2012—2023 年在新疆玛纳斯河流域下野地灌区开展田间试验,设置两种排水措施(ODD:明沟排水,明沟底宽 0.7 m+顶宽 10 m,沟深 2.2 m;SPD:暗管排水,暗管管径 70 mm,埋深 2.2 m)。针对明沟和暗管排水措施下排水排盐特征、土壤盐分运移及棉花生物量、产量变化开展研究。结果表明:(1)2012—2023 年 ODD 处理正常排水,而 SPD 处理自 2020 年起停止排水。2012—2019 年共同排水期间,ODD 和 SPD 处理 0~200 cm 土层脱盐率分别为 79.1%和 72.0%。(2)2020—2023 年,ODD 处理 0~200 cm 土层含盐量相比 2019 年平均下降 28.3%;暗管排水工程失效后,0~80 cm 土层含盐量平均下降 4.6%,而 80~200 cm 土层含盐量增加 14.3%,呈现“上层脱盐,下层积盐”现象。(3)2019 年,两种排水处理下棉花生物量和产量与 2012 年相比差异极显著($P<0.001$),ODD 和 SPD 处理棉花产量分别是 2012 年的 19.07 倍和 19.90 倍;2020—2023 年间,ODD 处理下棉花根、茎、叶干物质量、百铃重、有效铃数及产量增幅相比 SPD 处理分别高 52.7%、53.4%、10.2%、83.1%、10.3%和 40.6%。土壤盐分分布与棉花生长对不同排水措施的响应特征表明,ODD 和 SPD 处理均可有效移除土壤中多余的水分,加速土壤盐分淋洗过程,改善灌区土壤水盐状况,但 ODD 处理排水控盐效果更加突出。

**关键词**:明沟排水;暗管排水;土壤盐分;棉花产量;新疆玛纳斯流域灌区

**中图分类号**:S276;S156.4 **文献标志码**:A

# Study on salt effect of drainage and salt control in open ditch and subsurface pipe drainage and regularity of salt return after failure of subsurface pipe

YE Fuhai, LIU Hongguang, TANG Hua, LI Ling, GONG Ping, LI Pengfei

(*College of Water & Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*)

**Abstract**: A 12-year field experiment was conducted in the Xiayedi irrigation district of the Manas River Basin, Xinjiang (2012-2023), to investigate the difference of long-term drainage and salt control between open ditch and subsurface pipe and the characteristics of soil salt spatial migration after subsurface pipe failure. A total of two drainage measures (ODD: open ditch drainage, open ditch bottom width 1 m + top width 3 m, ditch depth 2.2 m; SPD: subsurface pipe drainage, pipe diameter 70 mm, buried depth 2.2 m) were installed. The characteristics of drainage and salt discharge, soil salt transport, cotton biomass, and yield changes under open ditch and subsurface pipe drainage measures were studied. The results showed that, (1) The ODD treatment was normally drained from 2012 to 2023, while the SPD treatment stopped draining from 2020. During the co-drainage period from 2012 to 2019, the desalination rate of the 0~200 cm soil layer reached 79.1% and 72.0% for the ODD and SPD treatments, respectively. (2) In 2020-2023, the salinity in the 0~200 cm soil layer of the ODD treatment decreased by 28.3% on average compared to 2019. After the failure of the culvert drainage project, the salinity in the 0~80 cm soil layer decreased by 4.6% on average, while the salinity in the 80~200 cm soil layer increased by 14.3%,

**收稿日期**:2024-11-22 **修回日期**:2025-03-12

**基金项目**:国家自然科学基金(52069026);新疆生产建设兵团财政科技计划项目(2023AB073)

**作者简介**:冶福海(1998-),男,青海西宁人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:2274640932@qq.com

**通信作者**:汤骅(1968-),男,江苏扬州人,教授,主要从事干旱区节水灌溉与盐渍化研究。E-mail:thlx@shzu.edu.cn

resulting in the phenomenon of "desalination in the upper layer and accumulation of salt in the lower layer". (3) In 2019, cotton biomass and yield under both drainage treatments reached the level of highly significant difference ($P$ <0.001) compared with 2012, in which the cotton yields under ODD and SPD treatments were 19.07 times and 19.90 times that of 2012, respectively. During the period of 2020-2023, the dry matter mass of roots, stems, and leaves, the weight of 100 bolls, the number of effective bolls, and the yield in ODD treatment increased by 52.7%, 53.4%, 10.2%, 83.1%, 10.3%, and 40.6%, respectively, compared with those of SPD. The response characteristics of soil salt distribution and cotton growth to different drainage measures showed that both ODD and SPD treatments could effectively remove excess water in soil, accelerate the process of soil salt leaching, and improve the soil water and salt status in the irrigation area, but the effect of ODD treatment on drainage and salt control was more outstanding.

**Keywords**: open-ditch drainage; subsurface pipes drainage; soil salinity; cotton yield; Manas River Basin irrigation district in Xinjiang

土壤盐渍化和干旱缺水是制约新疆农业可持续发展的重要因素[1]。新疆作为我国农业大区,现有近 1/3 的耕地受到盐碱危害,土壤盐渍化严重制约着新疆农业经济的可持续发展[2]。随着膜下滴灌技术在新疆广泛应用,传统的排水渠逐渐被废弃,形成了"滴灌无排"模式[3],尽管该技术在使用初期能够降低土壤盐分含量,但长期使用会导致田间土壤盐分增加。因此,合理灌排是防治和改良土壤盐碱化和次生盐渍化的重要措施。

滴灌淋洗配套排水措施是改善土壤质量最直接且最有效的方法之一,已得到广泛应用[4]。目前最常用的排水措施有明沟排水(ODD)和暗管排水(SPD),两者都是遵循"盐随水来、盐随水去"的水盐运移原理,将土壤中的可溶性盐渗入地下水体通过明沟或暗管排出[5]。在农田实施排水措施不仅可以显著降低土壤盐分含量,改善土壤理化性质,有效提升作物产量[6],同时还能提高作物水分利用效率,并能有效解决内涝问题[7]。明沟和暗管排水措施在不同地区得到应用,张金龙等[8]在滨海地区基于不同排水间距对盐土淋洗脱盐效果的研究发现:排水间距越小,SPD 系统稳定排水流量越大,淋洗初期的排水矿化度也越大,排水排盐效率越高。窦旭等[9]在河套灌区暗管埋深 0.6~1.0 m、间距 20 m 时发现:灌水淋洗和排水措施相结合降低了土壤盐分含量,控制了地下水埋深,弱化了土壤盐分空间异质性,促进了土壤盐分分布从异质性向均质性转变,改善了土壤质量,减弱了土壤盐碱化趋势。Wang 等[2]和 He 等[4]研究 ODD 和 SPD 处理对新疆土壤盐分的淋洗效果表明,两种排水措施均能有效浸出土壤中的盐分、降低地下水埋深。

综上,盐碱地改良的研究多集中于土壤水盐运移规律、土壤理化性质、盐渍土改良技术参数[10-12]等方面,且前人的研究成果普遍认为,在盐碱地上应用滴灌淋洗配套排水措施会有效降低土壤中盐分含量,可为作物生长创造适宜的水土环境,有利于作物增产。但先前的研究大多是对短期影响(≤ 2 a)进行的定量评估,关于长期采用膜下滴灌结合 ODD 或 SPD 措施对土壤水盐变化特征尤其是排水排盐特征的研究尚不多见。因此本研究开展了为期 12 a 的盐碱土改良试验,研究不同排水方式对土壤盐度、排水排盐特征及作物产量的影响,并探讨暗管停止排水后土壤盐分随滴灌年限的变化趋势,可为膜下滴灌应用中不同排水技术的合理利用提供参考依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

研究区位于新疆玛纳斯河流域下野地灌区(85°27′~85°41′E,44°37′~44°48′N),靠近玛纳斯河西岸大渠,属于典型绿洲盐碱区域。该地区为典型的大陆干旱沙漠气候,年均降水量和蒸发量分别为 141.8 mm 和 1 826.2 mm,年平均日照时数 2 861.6 h,年平均气温 6.5~7.2 ℃。试验区土壤为砂壤土,灌溉季节(4—10 月)地下水埋深 1.5~2.1 m,非灌溉季节地下水埋深均在 2.2 m 以下,地下水矿化度为 23.0~44.0 g·$L^{-1}$。0~200 cm 土壤初始含盐量基本在 10 g·$kg^{-1}$以上,按照盐碱化分类标准,属于重度盐碱化土壤,其主要物理性质如表 1 所示。

### 1.2　试验设计

试验区东西直线长 1 014 m,南北直线长 80 m,总占地面积约 8.1 $hm^2$。共划分为 6 个试验区域(每个区域面积为 144 m×80 m)。试验区与西岸大渠之间设有一条隔水沟,用于减缓大渠对试验区地下水位的影响。明沟开挖及暗管铺设均于 2011 年 10 月

进行,利用挖掘机进行暗管开沟、铺设、回填工作。暗管沿南北方向铺设,内径 70 mm,间距 48 m,埋深 2.2 m,设计坡度为 3%,共铺设 9 根暗管,暗管开口孔径 10 mm,开孔率 5.9%,暗管外包裹一层无纺布,管道四周填充 20 cm 深度的砂砾石料。明沟底宽 0.7 m,顶宽 10 m,深度、间距、坡度及数量均与暗管一致。同时在每个试验区各布置一个地下水观测井,观测井位于相邻暗管的中间位置(图 1,见 218 页)。

试验区一直采用膜下滴灌技术种植棉花,以新陆早系列中绒棉为主。采用"1 膜 2 管 6 行"的种植方式,棉花窄行和宽行间距分别为 10 cm 和 70 cm,膜间间距 40 cm,膜宽 2 m。采用单翼迷宫式滴灌带,滴灌带直径 16 mm,单孔出流量为 3.2 L·$h^{-1}$,滴头间距 30 cm。灌溉水取自玛纳斯河西岸大渠,其矿化度为 0.63~0.96 g·$L^{-1}$,pH 值为 7.82。根据当地田间管理方式,灌溉周期为 7~10 d,全生育期灌水 10 次,总灌水量为 744~754 mm,灌溉制度见表 2。肥随水入,根据当地推荐的施肥水平和方法,30%的氮肥用作基肥,70%的氮肥用作追肥,所有磷、钾和微肥在 5 月上旬基本施用(N 240 kg·$hm^{-2}$、$P_2O_5$ 105 kg·$hm^{-2}$、$K_2O$ 75 kg·$hm^{-2}$、$FeSO_4$ 19.5 kg·$hm^{-2}$、$MnSO_4$ 10.5 kg·$hm^{-2}$、$ZnSO_4$ 10.5 kg·$hm^{-2}$)所用肥料分别为尿素(46% N)、磷酸钙($P_2O_5$ 46%)、硫酸钾($K_2O$ 51%)。棉花种植模式见图 1d(见 218 页)。

**表 1 研究区土壤的主要物理特性**

Table 1 Main physical properties of the soil in the study area

| 处理 Treatment | 土壤深度 Soil depth /cm | 土壤质地 Soil texture | 颗粒组成 Particle mass fraction/% | | | 容重 Bulk density /(g·$cm^{-3}$) | 饱和含水率 Saturated moisture/% | 田间持水率 Field capacity/% | 含盐量 Salt content /(g·$kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ≥0.02 mm | 0.02~0.002 mm | ≤0.002 mm | | | | |
| 明沟排水 Open ditch drainage | 0~50 | 砂壤土 Sandy loam | 61.47 | 34.48 | 4.05 | 1.38 | 41.14 | 25.18 | 23.66 |
| | 50~100 | | 68.23 | 29.35 | 2.42 | 1.39 | 42.66 | 25.45 | 18.12 |
| | 100~150 | | 71.57 | 23.48 | 4.95 | 1.42 | 43.15 | 26.14 | 15.74 |
| | 150~200 | | 66.24 | 30.55 | 3.21 | 1.43 | 45.31 | 26.48 | 13.50 |
| 暗管排水 Subsurface pipe drainage | 0~50 | 砂壤土 Sandy loam | 62.25 | 34.87 | 3.88 | 1.38 | 42.34 | 25.04 | 24.37 |
| | 50~100 | | 67.11 | 30.14 | 2.75 | 1.39 | 43.14 | 25.49 | 18.38 |
| | 100~150 | | 70.76 | 24.51 | 4.73 | 1.41 | 44.25 | 26.33 | 16.18 |
| | 150~200 | | 65.45 | 31.23 | 3.32 | 1.42 | 46.18 | 26.54 | 13.80 |

**表 2 试验区 2012—2023 年各时期灌水定额/mm**

Table 2 Irrigation quotas for each period from 2012 to 2023 in the experimental area

| 年份 Year | 5 月 May | | 6 月 June | | 7 月 July | | | 8 月 August | | 合计 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 上旬 Early | 下旬 Late | 上旬 Early | 下旬 Late | 上旬 Early | 中旬 Mid | 下旬 Late | 上旬 Early | 下旬 Late | |
| 2012 | 120.0 | 60.2 | 76.5 | 81.5 | 73.8 | 84.5 | 91.5 | 82.7 | 73.3 | 744.0 |
| 2013 | 122.5 | 57.5 | 77.6 | 80.3 | 73.5 | 83.9 | 92.8 | 86.3 | 71.9 | 746.3 |
| 2014 | 120.6 | 59.4 | 81.5 | 82.4 | 75.1 | 85.1 | 91.6 | 80.4 | 75.5 | 751.6 |
| 2015 | 120.9 | 59.1 | 77.9 | 81.7 | 74.2 | 81.5 | 93.4 | 82.6 | 76.9 | 748.2 |
| 2016 | 123.3 | 56.7 | 77.4 | 82.6 | 77.9 | 83.9 | 88.5 | 81.3 | 75.4 | 747.0 |
| 2017 | 120.7 | 59.9 | 76.5 | 83.5 | 74.4 | 80.3 | 93.2 | 85.9 | 77.1 | 751.5 |
| 2018 | 121.2 | 58.8 | 79.2 | 80.8 | 78.5 | 86.4 | 88.6 | 83.4 | 73.7 | 750.6 |
| 2019 | 122.8 | 57.2 | 78.9 | 87.9 | 72.3 | 84.1 | 86.9 | 82.2 | 75.6 | 747.9 |
| 2020 | 120.5 | 59.5 | 79.7 | 80.3 | 76.5 | 87.9 | 91.5 | 85.5 | 72.6 | 754.0 |
| 2021 | 117.9 | 62.5 | 75.5 | 84.9 | 72.8 | 88.3 | 93.3 | 88 | 70.5 | 753.7 |
| 2022 | 115.2 | 64.8 | 74.2 | 85.8 | 79.4 | 84.7 | 97.9 | 80.9 | 68.9 | 751.8 |
| 2023 | 118.4 | 54.6 | 76.8 | 83.2 | 77.9 | 86.8 | 92.8 | 84.4 | 75.7 | 750.6 |

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 采集与分析 2012—2023 年对研究区棉田进行定点取样,取样时间在每年 5 月中旬苗期、7 月中旬花铃期和 9 月下旬吐絮期。为探究不同处理对盐分的淋洗效果,采样点选择在明沟与暗管中间膜下位置,取样深度 0~200 cm,间隔 20 cm 取一个样,每个处理重复 3 次。将取回的土样自然风干并研磨,过 2 mm 筛,按照土水质量比为 1∶5 混合后震荡、过滤,对每个样本的浸提液用 DDS-11A 型数显电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定其电导率,再利用干燥残渣法标定土壤电导率与土壤含盐量的关系,标定关系式为:

$$Q = 3.7219EC_{1:5} + 0.4401, \quad R^2 = 0.98 \quad (1)$$

式中,$Q$ 为土壤含盐量(g·$kg^{-1}$);$EC_{1:5}$为土壤浸提液的电导率(mS·$cm^{-1}$)。

土壤脱盐率计算如下:

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \quad (2)$$

式中,$N$ 为土壤脱盐率(%);$S_1$为初始土壤盐分总量($g \cdot kg^{-1}$);$S_2$为试验后土壤盐分总量($g \cdot kg^{-1}$)。

1.3.2　排水监测　在每个暗管的出水口位置分别安装电子水表,监测暗管排出水量。明沟排水量通过测量沟内水深进行计算,具体方式为:在沟内选择几个固定的测量点,利用卷尺测量每个点的水深,同时测量沟底面积,通过公式计算出排水量。在每月上旬、中旬及下旬收集水样,并带回实验室测其矿化度。试验区暗管于 2020 年停止排水,故 2020 年以后没有收集到水样。暗管排水量通过水表直接获得,明沟排水量、明沟和暗管排水矿化度及排盐量的计算公式为:

$$W = S \times H \times I \tag{3}$$

$$\rho = (m_1 - m_2) \times 1000/V \tag{4}$$

$$D = \sum W \times \rho \tag{5}$$

式中,$W$ 为单位时间内明沟的排水量($m^3$);$S$ 表示测量区域的明沟沟底面积($m^2$);$H$ 为所有测量点水深的平均值(m);$I$ 为明沟的排水能力系数,通常取 0.7;$\rho$ 为排水矿化度($g \cdot L^{-1}$);$m_1$为水样在烘干后蒸发皿的质量(g);$m_2$为蒸发皿的初始质量(g);$V$ 为待测矿化度的排水水样体积(mL);$D$ 为明沟排盐量(t)。

1.3.3　生物量和产量　在收获阶段,在明沟和暗管处理地块中随机选择 3 株生长均匀的棉花植株。将根、茎、叶分离,经 105℃高温杀青 0.5 h 后调至 75℃烘干至恒重,冷却后称重。随机选取明沟和暗管处理地块的 3 个 1 m×2.4 m 植株样品,对籽棉产量进行称重。测定的产量因子为百铃重、株数和单株有效铃数。

### 1.4　数据处理

采用 Excel 2020 进行数据处理;采用 Origin 2020 进行图形绘制;采用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析、显著性分析和方差分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　排水对土壤盐分变化的影响

历年(2012—2023 年)不同排水方式下各土层盐分年际变化差异显著($P<0.05$),土壤含盐量逐年下降(图 2)。由图 2 可知,2012 年各处理土层盐分含量相对较高($13.59 \sim 18.16\ g \cdot kg^{-1}$),属于重度盐碱土。与排水前相比,ODD 处理下 0~100 cm 土层盐分平均降低 24%,100~200 cm 土层盐分平均增加 14.2%,暗管处理类似。2013 年两种处理各土层盐分显著下降,其中 0~20 cm 和 20~40 cm 土层降幅最大,ODD 处理相比上一年分别降低 25.4% 和 23.6%,SPD 处理分别降低 23.7% 和 29.8%,其余土层降幅较小,两种处理在所有土层均实现有效脱盐。此后随着排水时间延长,脱盐效果逐渐减弱。与 2012 年相比,2019 年 ODD 处理 20、40、60、80 cm 土层盐分分别降低 66.8%、75.2%、73.4%、70.8%,SPD 处理则分别降低 63.6%、69.1%、67.7%、64.7%,而 80 cm 以下土层,各处理盐分降幅均小于上层。值得注意的是,在 2012—2019 年排水期间,ODD 处理各土层盐分下降幅度几乎均大于 SPD 处理。2019 年以后,ODD 处理继续排水,初期各土层盐分有所下降,随后趋于稳定。2023 年 0~200 cm 土层盐分含量较 2019 年降低 28.3%。

### 2.2　暗管停止排水对土壤盐分变化的影响

2020—2023 年,SPD 处理在生育期常规灌溉下无排水产生。由图 2 可知,盐分在土层中从上到下呈现先减少后增加的趋势。灌溉使 0~80 cm 土层盐分含量逐年下降,较上一年降幅依次为 8.4%、4.5%、5.7%、5.6%。该深度范围内,20~40 cm 土层盐分含量最低($3.50 \sim 4.55\ g \cdot kg^{-1}$),40~60 cm 土层次之($4.04 \sim 4.82\ g \cdot kg^{-1}$)。而 80 cm 以下土层盐分随滴灌年限增加,140~160 cm 土层盐分积累最明显($6.02 \sim 6.61\ g \cdot kg^{-1}$)。总体来看,在 0~200 cm 土层平均盐分含量较上一年均呈增加趋势。这表明暗管停止排水后,随着滴灌年限延长,上层土壤逐渐脱盐,深层土壤逐渐积盐,但整体土壤盐分含量呈现上升态势。

### 2.3　历年不同排水方式排水排盐特征

2.3.1　不同排水方式对排水过程的影响　图 3 展示了历年不同排水方式下排水流量随时间的变化。不同处理间排水流量随时间变化差异显著($P<0.01$),总体随排水时间延长而降低。每年初始排水阶段,ODD 处理排水流量较低,8 月(花铃期)达到峰值,且呈现为单峰,后又逐渐下降。相比之下,SPD 处理初期排水流量最大,随后逐渐减小。2012 年,ODD 处理 5—9 月平均排水流量依次为 0.33、0.41、0.53、0.63、0.51 $m^3 \cdot d^{-1}$,SPD 处理对应为 0.50、0.39、0.35、0.36、0.35 $m^3 \cdot d^{-1}$。ODD 处理最大平均排水流量较 SPD 处理显著增加 26.0%。至 2019 年,SPD 处理 5—9 月平均排水流量降至最低,依次为0.11、0.07、0.06、0.06、0.05 $m^3 \cdot d^{-1}$,较 2012 年分别降低78.0%、82.1%、74.4%、83.3%、85.7%;ODD 处理依次为 0.16、0.23、0.32、0.37、0.31 $m^3 \cdot d^{-1}$,较 2012 年分别降低 51.5%、43.9%、39.6%、41.3%、39.2%,可见,SPD 处理排水流量随时间下降的幅度更显著。自 2020 年起暗管停止排水,故排水

流量为 0 $m^3 \cdot d^{-1}$,而 ODD 处理排水流量持续下降,2023 年 5—9 月平均排水流量分别降至 0.02、0.03、0.03、0.01、0.02 $m^3 \cdot d^{-1}$。

图 4 为历年排水矿化度动态变化。不同排水方式下矿化度随时间的变化均差异显著($P<0.01$),随排水年限的增加矿化度逐年降低。在各生长季节,不同处理矿化度均为先上升后下降。ODD 和 SPD 处理均在每年 6 月矿化度达到峰值,其次为 5 月,具体表现为 6 月>5 月>7 月>8 月>9 月。与排水峰值相比,ODD 处理排盐峰值超前于排水峰值,而 SPD 处理排盐峰值则恒滞后于排水峰值。2012—2019 年期间,ODD 处理平均排水矿化度从 72.12~93.27 g·$L^{-1}$降至 33.64~50.20 g·$L^{-1}$,降幅为 46.2%~53.3%;SPD 处理从 94.51~112.59 g·$L^{-1}$降至 2018 年的 53.32~72.36 g·$L^{-1}$,2019 年又升至 63.04~75.76 g·$L^{-1}$,降幅为 32.7%~33.3%。2020 年起仅明沟正常排水,其矿化度随时间逐渐下降,2023 年降至 15.23~25.74 g。

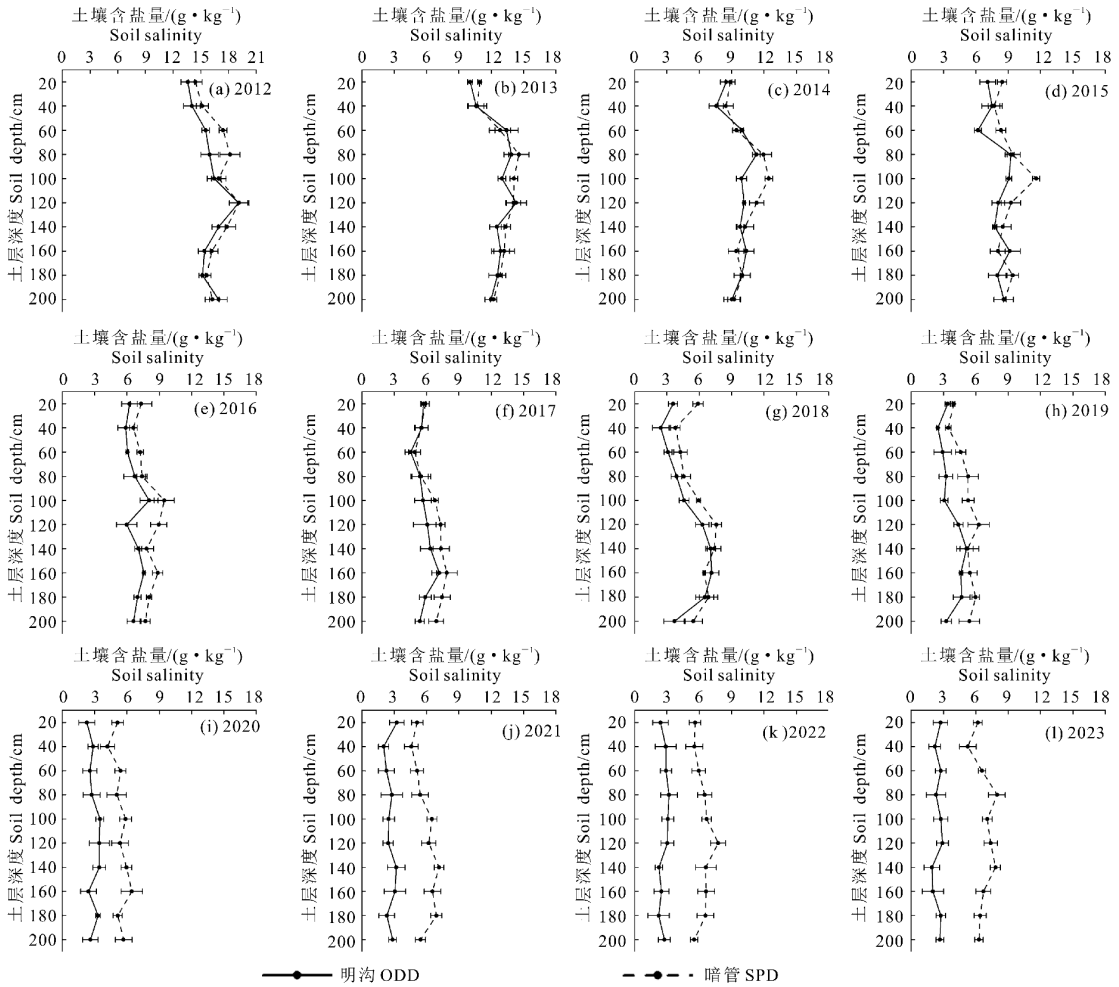



**图 2 明沟和暗管排水条件下土壤盐分变化特征**

Fig.2 Characteristics of soil salinity variation under ditch and subsurface drainage

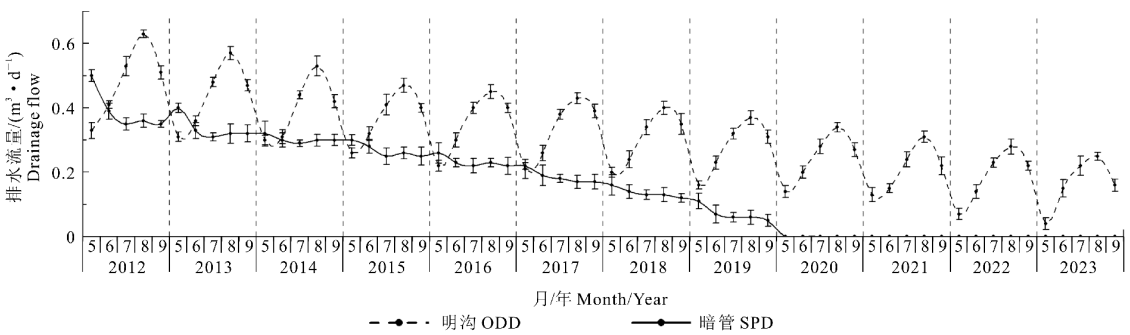



**图 3 2012—2023 年明沟和暗管排水流量动态变化**

Fig.3 Dynamics changes in drainage flow of open ditches and subsurface pipelines from 2012 to 2023

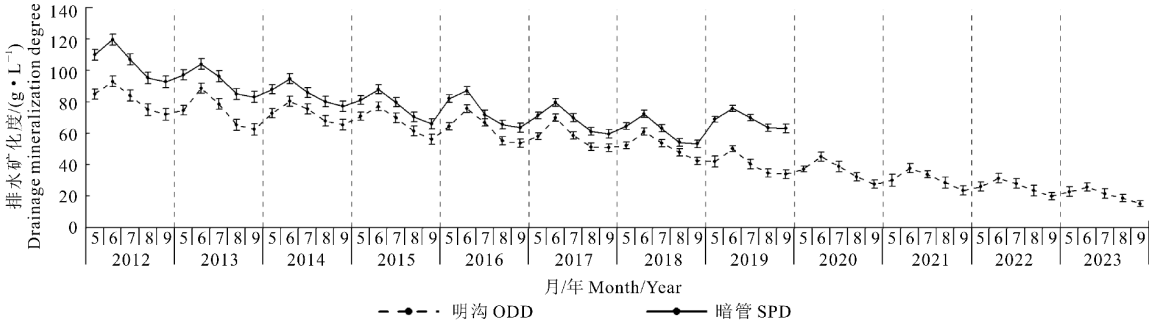



**图 4　2012—2023 年明沟和暗管排水矿化度动态变化**

Fig.4　Dynamics changes of mineralization degree in open ditches and subsurface from 2012 to 2023

2.3.2　不同排水方式对排水量和排盐量的影响

排水方式对排水量和排盐量影响显著($P<0.05$),且两种处理下排水量与排盐量均呈正相关关系(图 5,图 6,见 220 页)。随着排水系统使用年限的增加,排水量和排盐量均呈现逐年递减趋势。ODD 处理各时期排水量均为 8 月>9 月>7 月>6 月>5 月,SPD 处理则为 5 月>6 月>7 月>8 月>9 月,不同年份间相同处理各时期的排水量几乎均随排水年限增加而降低,两者的排盐量变化规律与排水量变化基本一致。2012—2015 年,每年不同处理累计排水量之间差异显著($P<0.05$),而排盐量无显著差异($P>0.05$)。与 SPD 处理相比,ODD 处理每年累计排水分别提升 27.5%、29.4%、28.5%和 34.5%。2016—2019 年,不同处理的累计排水量差异极显著($P<0.01$),ODD 处理每年累积排水量较 SPD 处理分别高 48.4%~272.2%;累计排盐量较 SPD 处理分别高 22.8%~113.8%;与 ODD 处理相比,2016 年后 SPD 处理排水量呈抛物线迅速降低,2018 年后 SPD 处理几乎失效。2019 年,ODD 和 SPD 处理累积排水量分别为 361.62 $m^3$ 和 96.4 $m^3$,较 2012 年分别降低 45.4%和 81.4%;累积排盐量分别为 14.14 t 和 6.45 t,较 2012 年分别降低 73.0%和 87.3%。2012—2019 年,ODD 处理累计排水量达到 3 965.94 $m^3$,累计排盐量达到 257.7 t,SPD 处理累计排水量达到 2 622.3 $m^3$,累计排盐量达到 213.4 t;与 SPD 处理相比,ODD 处理累计排水量和排盐量分别增加 51.23%和 20.75%。2020—2023 年,ODD 处理累计排水量和排盐量持续降低,2023 年 ODD 处理累计排水量达到 5 079.51 $m^3$,累计排盐量达到 289.6 t。综上,ODD 和 SPD 处理均能有效排出土壤中多余的水分,降低土壤盐分,并且在相同时期内 ODD 处理排水排盐效果显著优于 SPD 处理。

图 7 显示了 2012—2019 年不同排水方式下排水量与排盐量之间的关系。两者的排水量与排盐量之间均呈正相关关系。ODD 处理的排水量与排盐量为线性关系($R^2=0.766$)(图 7a),而 SPD 处理随着排水量的增大其排盐量呈开口向上的抛物线形式变化($R^2=0.961$)(图 7b)。两者均表现出极显著差异($P<0.01$)。回归结果表明,ODD 和 SPD 均随着排水量增加其排盐量也随之增加。拟合方程分别为:

$$y_1 = 0.0784x_1 - 1.3267,\quad R^2 = 0.766 \qquad (6)$$

$$y_2 = 0.0004x_2^2 + 0.0477x_2 + 0.0335,\quad R^2 = 0.961 \qquad (7)$$

式中,$y_1$为明沟排盐量(t);$x_1$为明沟排水量($m^3$);$y_2$为暗管排盐量(t);$x_2$为暗管排水量($m^3$)。

## 2.4　历年不同排水方式对棉花干物质量的影响

不同排水方式下棉花干物质量变化如图 8a~c 所示。排水处理使棉花根、茎、叶年干物质量增加,但随排水时间增加,增长率逐渐降低。2012—2019 年,各处理棉花根、茎、叶干物质量逐渐年递增,ODD 处理棉花根、茎、叶干物质量分别是 2012 年的 1.39 倍、2.06 倍、1.81 倍,SPD 处理则分别为 1.43 倍、2.13倍、1.86 倍,SPD 处理干物质量增幅大于 ODD 处理。在排水初期,ODD 和 SPD 处理棉花干物质量均快速增长,如 2013 年 ODD 和 SPD 处理根干物质量较上一年分别增加 15.9%和 15.1%。此外,各年度不同处理下棉花根、茎、叶干物质量差异显著($P<0.05$),ODD 处理显著高于 SPD 处理;2020—2023 年,ODD 处理棉花根、茎、叶干物质量持续增加,2023 年上述各器官干物质量分别是 2012 年的 1.49 倍、2.32 倍、2.12 倍。然而,SPD 处理棉花根、茎、叶干物质量增幅显著下降,相比 2019 年分别仅增加 5.3%、9.2%和 16.9%。由图 8a~c 可知,不同排水方式下干物质量随排水系统应用年限呈抛物线缓慢增加,明沟对其促进效果较暗管显著($P<0.05$)。2020 年暗管失效后干物质量增长变缓,2022 年与 ODD 处理差异增大($P<0.01$)。

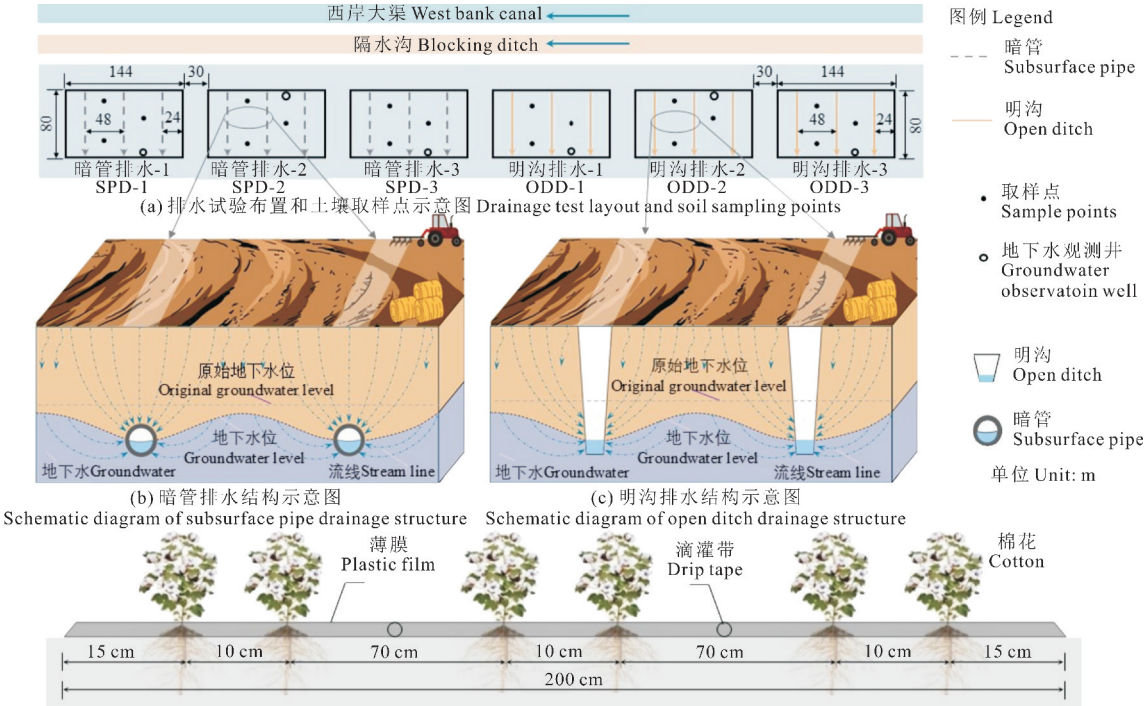
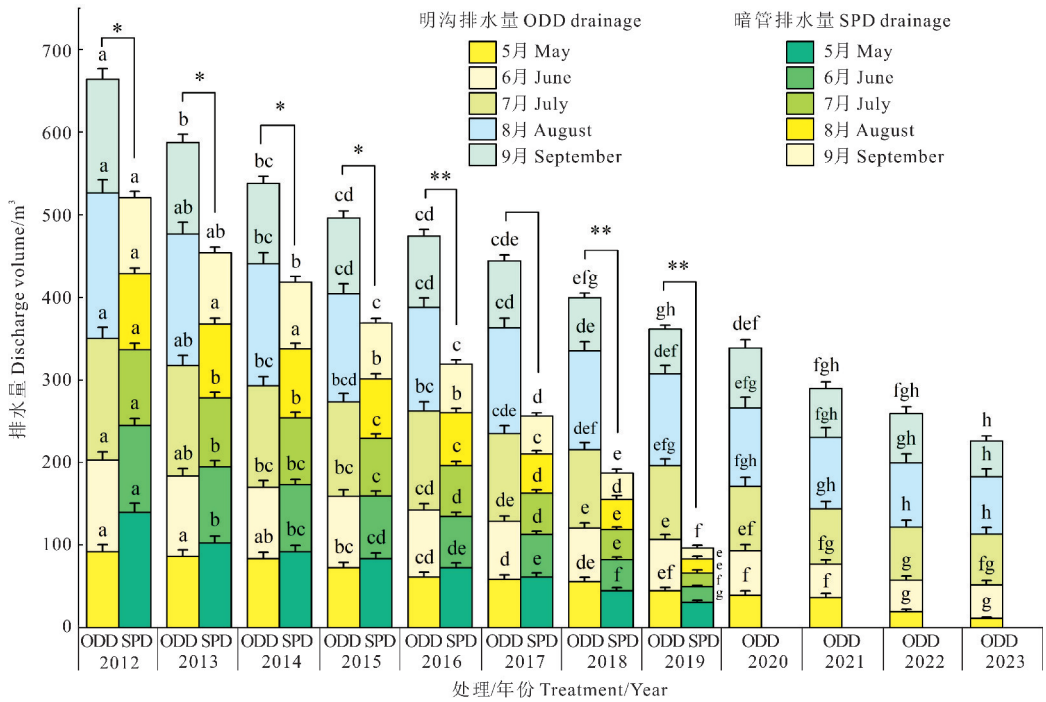



**图 1 试验设计示意图**

Fig.1 Schematic diagram of test design




注:不同小写字母表示每年同一时期处理间差异显著($P$<0.05)。*表示不同处理在 $P$<0.05 水平下差异显著,**表示不同处理在 $P$<0.01 水平下差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments during the same period each year ($P$<0.05). * indicates significant differences between treatments at the $P$<0.05 level, ** indicates significant differences between treatments at the $P$<0.01 level, same as below.

**图 5 2012—2023 年不同排水方式对排水量的影响**

Fig.5 Effects of different drainage treatment on drainage volume from 2012 to 2023

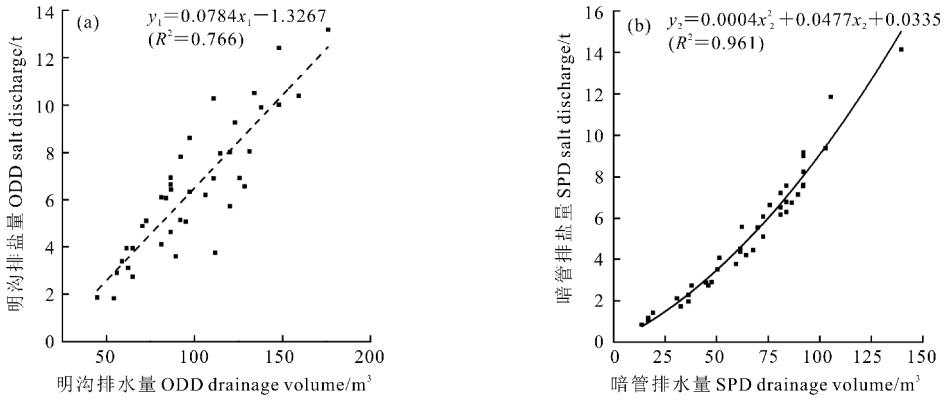



**图 7　明沟和暗管处理下排水量与排盐量关系示意图**

Fig.7　Schematic diagram of the relationship between drainage volume and salt discharge under open ditch and subsurface pipe treatment

### 2.5　历年不同排水方式对棉花产量及其构成的影响

不同排水方式下棉花百铃重、有效铃数和籽棉产量的变化如图 8d~f 所示。随排水时间增加,百铃重、有效铃数(单株开铃数)和籽棉产量均逐年增加,但增长率逐渐降低。2012 年,ODD 处理棉花百铃重为 218.8 g、有效铃数为 3.7、籽棉产量为 370.4 kg · $hm^{-2}$,SPD 处理对应为 197.6 g、3.3、331 kg · $hm^{-2}$,ODD 处理各指标较 SPD 处理分别高 10.7%、12.0%、11.9%,初步结果表明,ODD 处理在各项指标上均表现出显著优势。2019 年,经过 8 a 的排水处理,ODD 处理百铃重增至 474.4 g、有效铃数为 8.3、籽棉产量达到 7 064.4 kg · $hm^{-2}$,分别是 2012 年的 2.16 倍、2.24 倍、19.07 倍;而暗管处理百铃重增至 454.7 g、有效铃数为 8、籽棉产量达到 6 603.2 kg · $hm^{-2}$,分别是 2012 年的 2.30 倍、2.42 倍、19.9 倍。这一阶段各指标的显著增长再次验证了 ODD 处理在棉花生长过程中的显著优势。2020—2023 年,明沟继续排水进一步促进了棉花的生长,至 2023 年,其百铃重、有效铃数、籽棉产量分别达到 514.4 g、9.2、7 849.3 kg · $hm^{-2}$,相比 2019 年分别增加 7.7%、10.8%、11.1%。SPD 处理在此期间棉花生长相对平稳,其百铃重、有效铃数、籽棉产量分别增至 497.6 g、9.0、7140 kg · $hm^{-2}$,相比 2019 年分别增加 5.4%、7.8%、8.1%。

## 3　讨　论

### 3.1　不同排水方式对土壤盐分及地下水位变化的影响

明沟和暗管是农业灌溉系统中常用的两种排水方式,对于解决土壤盐渍化问题具有重要意义[13-14]。本研究发现,实施排水措施一年后,ODD 和 SPD 处理均在 0~100 cm 范围内形成脱盐,100 cm 以下出现积盐。说明有效的排水措施可在短期内形成上层土壤的快速脱盐和下层土壤的盐分积累。经过 8 a 排水洗盐后,ODD 和 SPD 处理在 0~200 cm 范围内脱盐率分别达到 79.1%和 72.0%。这一结果和前人的观察结果一致,即利用明沟和暗管可以控制地下水埋深,排出土壤中多余的水分,降低土壤盐分含量,改善土壤理化性质[4,15]。本试验中 0~80 cm 土层盐分下降速度较快,80~200 cm 土层盐分下降相对较慢,整体呈现盐分从上层土壤迁移至下层,然后逐渐淡化并最终实现所有土层均脱盐的现象[16]。这可归因于滴灌通过不断供水和渗透作用,逐步将盐分淋洗至耕层以下。同时地膜覆盖抑制了土壤水分蒸发,避免了膜下土壤盐分表聚[17]。此外,排水系统为土壤水分运动提供了通道,使得土壤中水分整体向下移动,从而带动盐分随之向下移动[18]。本研究认为滴灌条件下,两种排水措施均能有效降低土壤盐分含量,并且 ODD 处理排水洗盐效果显著优于 SPD 处理。图 9 显示了研究区在 2012—2023 年期间,每年 5—9 月中旬地下水位的动态变化情况。随着灌溉的进行,地下水位逐渐上升,两种处理下地下水位深度年度变化均为先上升后下降。同时,随着排水年限的延长,各处理地下水位逐年降低。相反,SPD 处理自 2020 年停止排水后,地下水位逐年上升。在整个研究时段内,SPD 处理地下水位通常均高于 ODD 处理。

### 3.2　不同排水方式对排水排盐性能的影响

排水流量和矿化度是评估排水系统运行状况和土壤盐分控制效果的重要指标[19-20]。本研究发现,随着排水系统使用年限的增加,两者的年均排水流量均呈现逐年降低趋势。在每年棉花生长季节,随着地下水位升高,ODD 处理排水流量逐渐增加,最大排水流量出现在 8 月(花铃期)。这是因为

随着地下水位升高,土壤中的孔隙水压力增加,形成了更为显著的水力梯度,促使土壤中的水分更快速地向低水位区域流动,包括向 ODD 系统集中流动[15]。因此,ODD 系统的排水流量随地下水位的升高而增加,而 SPD 处理在每年初始阶段(5 月)平均排水流量最大,然后逐渐由大变小,并且 2012 年各月平均排水流量均大于其他年份。这是因为挖沟铺管后,其回填土的压实度往往不会太大,土壤孔隙率相对较大,水流容易下渗所致。排水初期,土壤颗粒会在渗透水流带动下逐渐向下迁移并填充

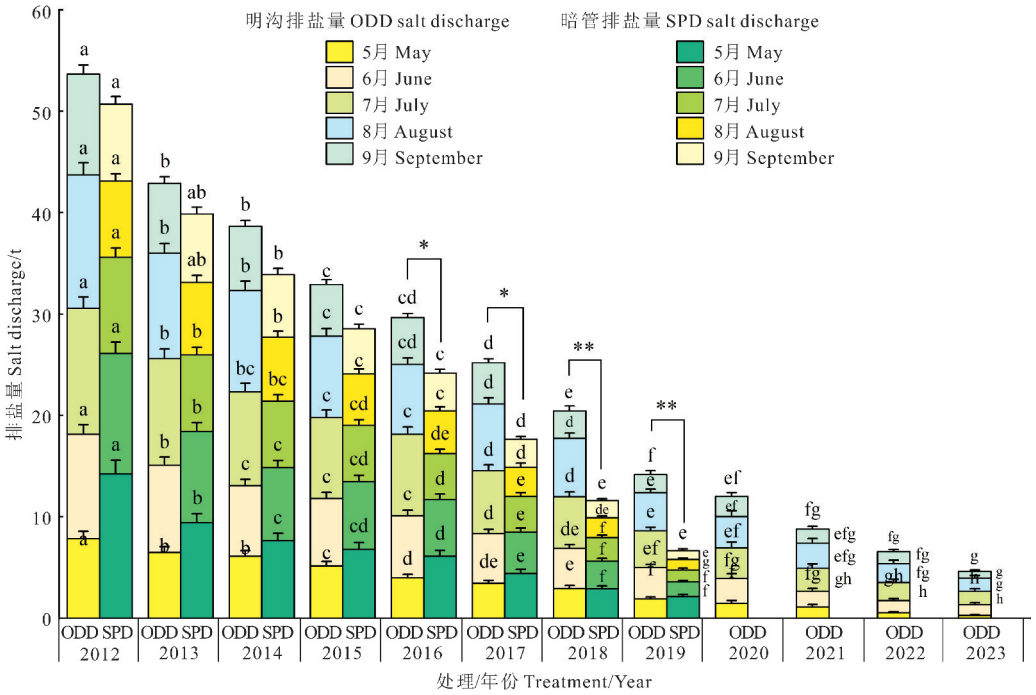



**图 6 2012—2023 年不同排水处理对排盐量的影响**

Fig.6 Effects of different drainage treatment on salt discharge from 2012 to 2023

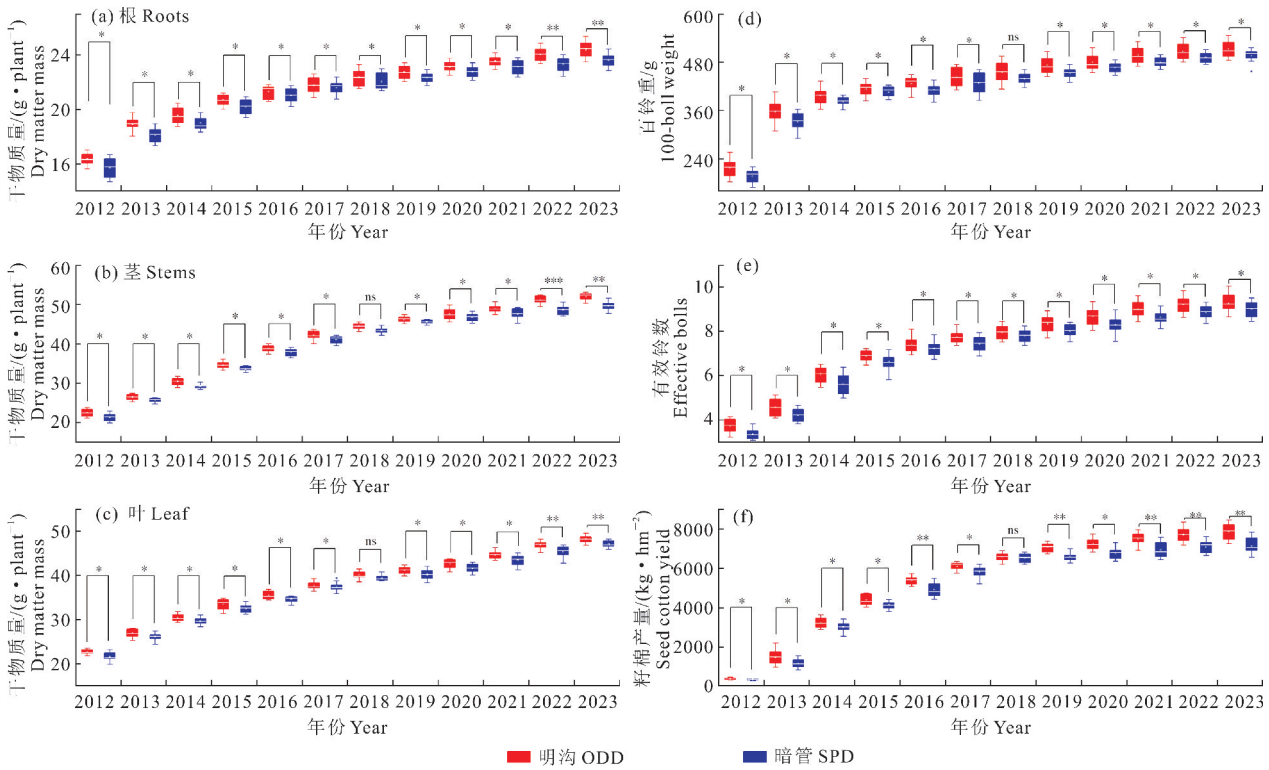



**图 8 2012—2023 年不同处理下棉花干物质量和产量**

Fig.8 Cotton dry matter mass and yield under different treatments from 2012 to 2023

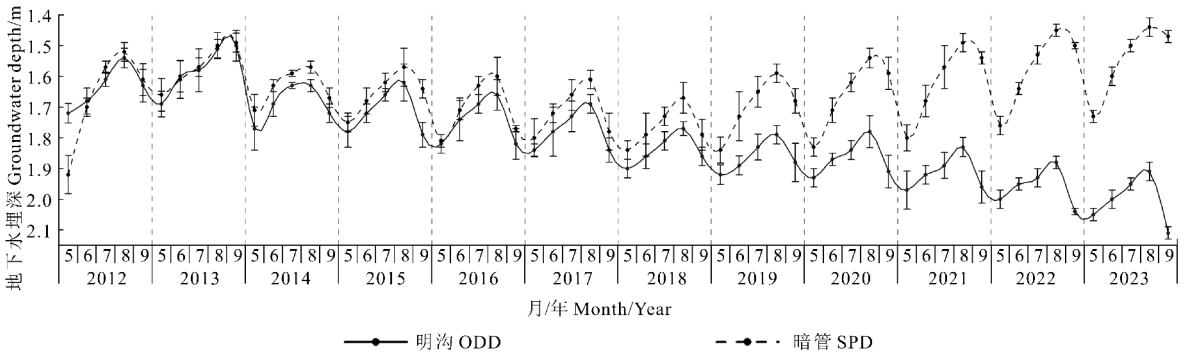



**图 9　研究区 2012—2023 年地下水埋深动态变化**

Fig.9　Dynamic changes in groundwater depth in the research area from 2012 to 2023

孔隙,由于土壤持续压实以及无纺布逐渐发生淤堵,因此流量随时间逐渐减小[21]。在试验期间,ODD 处理平均排水流量显著大于 SPD 处理,是因为在 ODD 和 SPD 处理的土壤流场中,每条流线的起点均垂直于地面,末端指向沟渠或管道。当灌溉和地下水上升导致水力梯度增加时,水流沿着流线向沟渠或管道汇集,然而明沟的汇流面位于明沟侧壁,而暗管的汇流面位于暗管管壁[22],因此,明沟的汇流面积显著大于暗管,从而导致 ODD 处理的排水流量显著大于 SPD 处理。后期两种处理排水流量逐渐减小,主要由于地下水位逐渐下降造成水头减小所致。此外,笔者认为由于试验中未对暗管进行定期清淤,导致暗管内部堵塞,也是造成 SPD 处理排水流量逐渐减小的一个重要原因。

在排水矿化度方面,无论是采用明沟还是暗管,排水矿化度均呈现先升高后降低的趋势。因为在初始排水阶段,由于灌水量有限,排水系统主要排放地下水,因此土壤中的盐分被淋洗到深层的速率相对较低,初期排水的矿化度不高。然而随着棉花生育期的推进,灌水量逐渐增加,导致土壤中更多的盐分逐渐向深层迁移并与地下水形成汇流渗入沟渠或暗管,因此排水矿化度达到高峰。然后随着生育期的继续推进,尽管灌水量达到最大,但之前的排水作用已使部分土壤盐分排出土体,导致排水矿化度逐渐降低。

此外,研究还发现不同排水处理的排水量与排盐量成正相关关系,而排水量与排水矿化度不成正相关关系,说明在计算土壤盐分排除量时,排水量占主导因素。因此,在试验期间,由于 ODD 处理排水流量通常显著大于 SPD 处理,所以在相同时间段内,ODD 处理排水排盐效果显著优于 SPD 处理。

### 3.3　排水对棉花生物量和产量的影响

在农业生产中,合理的水分管理是提高作物产量和品质的关键因素之一。有效的排水措施不仅能够改善土壤环境,还能显著促进作物的生长发育[23]。在本研究中,采用 ODD 和 SPD 措施对棉花生长产生了影响,这主要体现在棉花根、茎、叶干物质量的变化。随着时间的推移,排水降低了土壤盐度,从而促进了棉花干物质量的积累[24]。2019 年,不同处理下棉花根、茎、叶干物质量、百铃重、有效铃数及籽棉产量与试验初期相比均达到极显著差异水平($P$<0.001),且排水时间越长,其对作物增产效果愈加明显,这说明排水能够显著提高棉花生物量和产量[25-26]。这些发现均强调了排水处理在改善土壤条件和提高作物生产性能方面的重要作用。一方面是因为滴灌下的水渗透方式类似于点源渗透,在一定程度上抑制了盐的移动,同时排水系统降低了地下水位,抑制盐分上移,共同为作物的生长提供了低盐环境[27-28];另一方面是因为滴灌仅湿润部分农田,减少了杂草与作物争夺养分的干扰,进而促进了棉花的生长发育,提高了棉花产量。

### 3.4　暗管停止排水后对土壤盐分的影响

众多学者[29-31]对长期应用膜下滴灌与排水综合措施对土壤改良效果的影响进行了深入研究,均表明该技术能有效调控土壤水分和盐分的空间分布,有效降低浅层土壤盐分浓度,并有助于减缓深层土壤盐分的积累速度。但随着时间的延长,排水措施可能面临由于设施老化或不当维护而导致排水效果减弱或失效等问题。本试验中,暗管停止排水后的土壤盐分监测结果显示,尽管暗管停止排水,但膜下滴灌仍能在一定程度上维持上层土壤(20~80 cm)盐分的稳定或逐步下降,而深层土壤(>80 cm)盐分含量则逐渐增加。其中耕层(20~40 cm)土壤脱盐效果最佳,而 140~160 cm 土层盐分积累严重。这归因于滴灌系统能够精准地将水分直接输送到植物根系附近,持续的水分供应能够有效地将上层盐分淋洗至根区以下深度[32]。深层盐分增加的原因主要有两个:一是上层盐分逐渐被淋洗

至深层土壤,二是地下水位升高使得所携带的盐分停留在该区域,两种作用相互叠加就导致盐分在这一深度积聚。总体而言,0~200 cm 土层范围内平均土壤盐分含量每年均相比上一年有增加的趋势,这与前人的研究观点一致[33-34]。这反映出随着滴灌年限的延长,土壤平均含盐量由耕层向底层转型,使盐分在耕作层以下区域聚集,受蒸发和地下水上升补给的影响,最终导致盐分上移造成土壤次生盐渍化。因此,建议膜下滴灌系统在使用若干年后,根据盐分积累情况,实施灌排协同调控等措施,以维持棉田的可持续生产能力。

## 4 结 论

1)ODD 和 SPD 措施能够显著降低土壤盐分含量,从而改善土壤质量并促进作物生长。经过 8 a 的排水洗盐处理后,ODD 和 SPD 处理在 0~200 cm 土层的脱盐率分别达到 79.1%和 72.0%;产量分别是 2012 年的 19.07 倍和 19.90 倍。

2)两种排水方式下排水量与排盐量均成正相关关系,排水量越大排出的盐分越多,排水量与矿化度不成正相关关系,说明在排盐量计算中排水量占主导因素。共同排水期间 ODD 和 SPD 处理累计排水量分别为 3 965.94 $m^3$ 和 2 622.3 $m^3$,累计排盐量分别为 257.7 t 和 213.4 t。

3)暗管停止排水后,上层(0~80 cm)土壤盐分含量下降了 4.6%,下层(80~200 cm)土壤盐分增加了 14.3%,最终导致 0~200 cm 土层盐分含量呈现增加趋势。

**参 考 文 献:**


[1] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 221-228.
LIU Q Q, SU L T, LIU G M, et al. Spatio-temporalvariation and migration mechanism of soil salinity in Chanan irrigation area of Ili[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 221-228.

[2] WANG Z H, HENG T, LI W H, et al. Effects of subsurface pipe drainage on soil salinity in saline-sodic soil under mulched drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(1): 95-106.

[3] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 126-135.
TIAN F Q, WEN J, HU H C, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 126-135.

[4] HE X, LIU H, YE J, et al. Comparative investigation on soil salinity leaching under subsurface drainage and ditch drainage in Xinjiang arid region[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9: 109-118.

[5] 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 Y G, YANG H C, WANG K Y, et al. Shallow subsurface pipe drainage in Xinjiang lowers soil salinity and improves cotton seed yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 84-90.

[6] RITZEMA H, SCHULTZ B. Optimizing subsurface drainage practices in irrigated agriculture in the semi-arid and arid regions: experiences from Egypt, India and Pakistan[J]. Irrigation and Drainage, 2011, 60(3): 360-369.

[7] ISLAM M N, BELL R W, BARRETT-LENNARD E G, et al. Shallow surface and subsurface drains alleviate waterlogging and salinity in a clay-textured soil and improve the yield of sunflower in the Ganges delta[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2022, 42(2): 16.

[8] 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 J L, ZHANG Q, WANG Z Y, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 85-89.

[9] 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 X, SHI H B, LI R P, et al. Assessing the efficiency of subsurface drain in controlling soil salinization inHetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 102-110.

[10] 迟碧璇, 史海滨, 许迪, 等. 控制暗管排水下土壤剖面水盐分布与变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 148-158.
CHI B X, SHI H B, XU D, et al. Distribution and variation of water and salt in soil profile under controlling subsurface drainage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 148-158.

[11] 张丽, 焦平金, 董勤各, 等. 暗管间距和埋深对田间水盐运移变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 92-101.
ZHANG L, JIAO P J, DONG Q G, et al. Effects of spacing and depth of subsurface drain on water and salt transport in the field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 92-101.

[12] 赵铁民, 李渊博, 陈为峰, 等. 生物炭对滨海盐渍土理化性质及玉米幼苗抗氧化系统的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 196-200.
ZHAO T M, LI Y B, CHEN W F, et al. Effect of biochar on the physicochemical properties of coastal saline soil and the antioxidation system activity in maize seedlings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 196-200.

[13] MASTROCICCO M, COLOMBANI N, DI GIUSEPPE D, et al. Contribution of the subsurface drainage system in changing the nitrogen speciation of an agricultural soil located in a complex marsh environment (Ferrara, Italy)[J]. Agricultural Water Management, 2013, 119: 144-153.

[14] SLOAN B P, BASU N B, MANTILLA R. Hydrologic impacts of subsurface drainage at the field scale: Climate, landscape and anthropo-

genic controls[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 1-10.

[15] LIU Y, AO C, ZENG W Z, et al. Simulating water and salt transport in subsurface pipe drainage systems with HYDRUS-2D[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125823.

[16] SHI X Y, WANG H J, SONG J H, et al. Impact of saline soil improvement measures on salt content in the abandonment-reclamation process[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208: 104867.

[17] 张琼, 李光永, 柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J]. 水利学报, 2004, (9): 123-126.
ZHANG Q, LI G Y, CHAI F J. Effect of mulched drip irrigation frequency on soil salt regime and cotton growth[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (9): 123-126.

[18] 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 ER NA GU LI A M T, LIU H G, HE X L, 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, 2018, 36(4): 347-353.

[19] CHAPMAN A S, FOSTER I D L, LEES J A, et al. Sediment delivery from agricultural land to rivers via subsurface drainage[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(15): 2875-2897.

[20] CHRISTEN E, SKEHAN D. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(3): 148-155.

[21] 张迎奥, 王少丽, 郝瑞霞, 等. 基于两种土质的暗管土工布外包料反滤效果对比试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 270-276.
ZHANG Y A, WANG S L, HAO R X, et al. Comparative test on the anti-filtration effect of geotextile envelope material around subsurface drainage pipe using two kinds of soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 270-276.

[22] CHAHAR B R, VADODARIA G P. Steady subsurface drainage of ponded surface by an array of parallel ditches [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17: 895-908.

[23] 李法虎, KEREN R, BENHUR M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 64-69.
LI F H, KEREN R, BENHUR M. Analysis of spatial variability of soil characteristics and crop yield under subsurface drainage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 64-69.

[24] MIURA K, TADA Y S I. Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid [J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 4.

[25] FENG G X, ZHANG Z Y, WAN C Y, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system [J]. Agricultural Water Management, 2017, 193: 205-213.

[26] TOLOMIO M, BORIN M. Controlled drainage and crop production in a long-term experiment in North-Eastern Italy[J]. Agric Water Manage, 2019, 222: 21-29.

[27] BURT C M, ISBELL B. Leaching of accumulated soil salinity under drip irrigation [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48 (6): 2115-2121.

[28] ZHANG T B, DONG Q, ZHAN X Y, et al. Moving salts in an impermeable saline-sodic soil with drip irrigation to permit wolfberry production[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 636-645.

[29] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 67-74.
LI W H, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Soil salinity variation characteristics of cotton field under long-term mulched drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 67-74.

[30] 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 H C, HU DAN T M E B, SU L T, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (7): 18-22.

[31] 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 P N, DONG X G, LIU L, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 90-95.

[32] GUAN Z, JIA Z, ZHAO Z, et al. Dynamics and distribution ofsoil salinity under long-term mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China[J]. Water, 2019, 11(6): 14.

[33] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 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 J L, KANG Y H, JIAO Y P, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 59-63.

[34] 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, (8): 15-19.
ZHANG W, LV X, LI L H, et al.Salt transport law of subsurface drip irrigation in cotton fields in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, (8): 15-19.