

刘洪波,白云岗,卢震林,等.不同改良措施对重盐碱地夹层土壤的脱盐效果[J].华中农业大学学报,2025,44(2):177-189.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.018

不同改良措施对重盐碱地夹层土壤的脱盐效果

刘洪波^{1,2},白云岗^{1,2},卢震林^{1,2},郑明^{1,2},丁宇¹,肖军^{1,2},韩政宇¹

1.新疆水利水电科学研究院,乌鲁木齐 830049;

2.农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室,乌鲁木齐 830052

摘要 针对现有重盐碱地改良措施中工程量大与生产成本高的现实问题,以渭干河灌区规模化高效节水建设后集中连片形成的大面积重盐碱地夹层土壤为研究对象,通过大田小区试验,研究不同措施在冬灌条件下的土壤水盐变化规律,结果显示:各处理中以深翻处理脱盐率最高,为75.9%;其次是开沟打孔灌沙和打孔灌沙处理,分别为51.5%和39.4%;打水和开沟打孔比较接近,分别为38.2%和37.4%;开沟最低,为33.9%。通过2次和3次冬灌后,在0~20 cm土层,各处理含盐量由2020年冬灌前的7.06~11.61 g/kg降到2022年冬灌后的2.00~5.91 g/kg,脱盐率为76.8%~382.5%,表明表层土壤由初始的中重度盐碱土改良为轻中度盐碱土,反映出黏土夹层对水盐运移的阻滞作用,也表明打孔灌沙措施可以作为一种简单实用的措施来提高盐碱地的洗盐效果与抑制返盐。

关键词 土壤盐渍化;重盐碱地;土壤改良;脱盐;盐分淋洗;冬灌;夹层土壤

中图分类号 S56.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0177-13

新疆地处欧亚大陆腹地,降水稀少(年均147 mm),蒸发强烈(年均2 125 mm)、地下水浅区土壤盐碱化和次生盐碱化问题突出,被国际上喻为世界盐碱地博物馆。新疆盐碱地总面积2 181.4万hm²,占全国盐碱土(9 913万hm²)面积的22.01%^[1]。全疆盐渍化耕地面积233.1万hm²,占耕地总面积的37.7%(其中轻度、中度、重度盐渍化耕地面积分别占盐渍化耕地总面积的76.5%、20.5%、3%),南疆占比更高达49.6%,土壤盐渍化是制约新疆灌溉农业可持续发展的主要因素^[2]。

国内部分灌区对盐碱地土壤盐分淋洗多采用等定额统一漫灌,对漫灌定额的确定比较随意,容易导致盐分淋洗过度或淋洗不足。新疆普遍采取定期大水漫灌的淋洗方式作为土壤脱盐的重要手段,然而不合理的冬春灌淋洗方式与定额导致灌区土壤始终处于洗盐-积盐-洗盐的恶性循环过程中,致使棉田生育期0~60 cm土层表现为积盐状态,并以40~60 cm土层积盐最多^[2]。同时,现有耕作方式与传统模式相比发生了很大的改变,土壤剖面由地膜覆盖-耕作层-

犁底层形成了典型的“夹心”层状结构,导致地表以下一定深度土壤在垂直方向上逐渐形成结构致密且稳定的隔层。黏土层因透性差而不利于盐渍土冲洗与改良,尤其以60 cm埋深区域且黏土层厚度大于10 cm的最难淋洗^[3-4],土壤夹层的存在不仅会降低水分入渗速率^[5],同时会阻止水分蒸发^[6],最终导致盐分运移发生变化^[7]。

目前新疆针对重盐碱地主流的改良措施有暗管排水、竖井排水、明沟排水和其他组合等措施。采用竖井排水的改良措施可以调节地下水位,达到调控耕作区土壤水盐平衡的目的,但仅依靠竖井排水会导致土壤盐分在包气带的中下层停留,将加剧土壤次生盐渍化和地下水的水质恶化等风险^[8]。暗管排水是通过地表淡水对土壤进行淋溶,在水分下渗的同时带着盐分进入到埋设于土壤中的带孔吸水管,再通过吸水管汇入到集水井或排水沟中。但不同的暗管布置方式对土壤的排盐效果不同^[9]。明沟排水作为早期盐渍化土壤治理与改良的常用措施,同样具有较好的排盐效果^[10]。盐碱地在含黏土夹层的条

收稿日期:2024-06-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900805-04;2021YFD1900803-02);新疆维吾尔自治区重大科技计划项目(2022A02007-3);新疆天山英才领军人才培养项目(2022TSYCLJ0069)

刘洪波,E-mail:lhb090@163.com

通信作者:白云岗,E-mail:xjbaigy@sina.com

件下因其土壤物理特性具有“滞水抑盐”的显著特点^[11],成为盐碱地治理的重点与难点,主要表现在黏土夹层的质地^[7]、位置^[12-13]与厚度^[14]的不同对土壤水盐变化产生影响,即位置越高,则脱盐半径越小;厚度越大,脱盐效果越低^[15]。基于黏土夹层的特殊性,可通过打破该夹层,使土壤物理特性得到改善,从而达到促进水盐运动的目的,如在夹层位置相对较高时,有学者针对滨海盐碱地现状通过打孔打破黏土夹层后灌沙的改良措施来促进水分下渗以提高脱盐效果,结果表明在灌溉量 $1\,200\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、孔密度 $30\text{ 孔}/\text{m}^2$ 和打孔深度为 10 cm 时,脱盐总量相比对照处理提高 $50.7\%\sim 98.8\%$,且增加打孔密度能够促进脱盐效果,但随打孔深度而表现出差异^[16]。当黏土夹层位置较深时,有研究者通过挖坑和灌砂的方式对其进行改良处理,得出采用人工挖坑的最小孔径不小于 100 cm ,孔数为 15 、 60 、 135 和 $240\text{ 孔}/\text{hm}^2$,淋洗灌水定额为 $1\,500\sim 3\,000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时可有效提高土壤脱盐效果^[17]。

前人的研究显示,在实际生产中对于重盐碱且含夹层的土壤改良主要采用大水冬灌的方式进行盐分淋洗^[18-19],且由于盐碱地易返盐、治理难度大等特点,在当前高标准农田建设与规模化节水农业发展

背景下,竖井排水、明沟排水、暗管排水等工程措施逐渐得到发展与应用。因此,本研究借鉴前人工程改良^[20]、农艺改良^[2]、化学改良^[21]、生物改良^[22]和综合改良^[8]等经验措施,拟通过深翻、开沟和打孔等不同措施穿破土壤深层黏土夹层,分析重盐碱地在冬灌条件下不同改良措施的土壤脱盐效果以及对夹层土壤水盐运移规律的影响,旨在为重盐碱地夹层土壤的综合治理与开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验区位于新疆阿克苏地区沙雅县渭干河灌区海楼镇海楼村高效节水试验示范基地,于2019年新建成沙雅 3.33 万 hm^2 高效节水增收试点项目,核心试验区地处沙雅县境内北部($41^\circ 14' 30''\text{N}$, $82^\circ 43' 33''\text{E}$),渭干河西岸,距沙雅县城 10 km ,研究区降水稀少,气候干燥,常年平均日照 $3\,031.2\text{ h}$,多年平均气温 $10.7\text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 47.3 mm ,年均蒸发量 $2\,000.7\text{ mm}$ 。研究区地下水埋深 $1.9\sim 2.5\text{ m}$,土壤质地为粉砂质壤土,容重为 $1.51\sim 1.69\text{ g}/\text{cm}^3$,全氮 $0.5\text{ g}/\text{kg}$,全磷 $0.75\text{ g}/\text{kg}$,全钾 $19.72\text{ g}/\text{kg}$,pH值 8.75 。土壤耕作层含盐量均在 $10\text{ g}/\text{kg}$ 以上,盐份类型以硫酸盐-氯化物为主,属于重度盐化土。

表1 试验区土壤理化特性

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the experimental area

土壤深度/cm Soil depth	颗粒组成体积分数/% Particle composition			容重/(g/cm ³) Bulk density	含盐量/(g/kg) Salt content
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm		
0~10	5.87	85.72	8.41	1.65	14.09
10~20	5.51	86.51	7.98	1.56	11.68
20~30	6.16	88.08	5.76	1.51	10.79
30~40	5.88	87.39	6.73	1.61	10.86
40~50	4.32	88.64	7.04	1.38	21.18
50~60	5.77	91.02	3.21	1.56	24.07
60~70	6.75	90.14	3.11	1.73	29.97
70~80	4.68	86.13	9.19	1.69	24.06
80~90	4.29	84.21	11.5	1.55	19.77
90~100	5.41	89.82	4.77	1.57	16.12

1.2 试验设计

冬灌试验在2020年12月至2023年1月间进行,冬灌定额 $3\,150\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。在2020年设深翻(G1)和打孔(G2)2个处理,深翻采用龙工LG6060D履带式挖机对试验小区 1 m 深度土层进行均匀翻动。打孔采用额上星源科技发展有限公司的雅马哈159Fv四冲程地钻,孔径 6 cm ,孔密度 $36\text{ 孔}/100\text{ m}^2$,孔深 1 m 。各处理小区面积 100 m^2 ,重复2次。2021年新增打孔

灌沙(G3)、开沟(G4)、开沟打孔(G5)和开沟打孔灌沙(G6)4种措施,其中打孔灌沙措施采用与2020年相同孔密度,供试沙粒来自试验区外商品沙,质地为粗沙($0.25\sim 1\text{ mm}$),且沙粒本身不含盐分。开沟处理是采用相同型号挖机在垂直于农沟方向上,沿试验小区边上开挖排盐沟,沟宽 1 m 、深 2 m 、长 50 m ,间距 $6\sim 8\text{ m}$,排盐沟经过2次大水漫灌后进行回填。开沟打孔与开沟打孔灌沙处理则是在开沟处理的基

础上进行,其他参数与打孔灌沙处理相同。对照(CK)处理为常规重盐碱地,各处理小区面积均为100 m²。

1.3 试验过程

2020年11月12日对沙雅高效节水2万hm²核心示范区进行本底调查,经取样分析后选择具有一定代表性的重盐碱夹层土壤棉田作为试验区,面积约0.8 hm²,该试验区近3 a棉花几乎“零”产量。同年11月7日进行挖掘机深翻和打孔措施处理,12月1日进行冬灌前土壤取样,12月4日实施冬灌,灌水量3 150 m³/hm²,由于土壤表层以上40 cm受水浸泡和夹层土壤及冰冻的影响,渗水较缓,根据农户管理经验设计灌后取样间隔为1个月,即灌后土壤取样日期为2021年1月4日。

2021年5月13日,受极端天气冰雹的影响,紧靠试验区的盐碱地未进行棉花补种,于2021年7月11日进行挖机开沟、打孔灌沙、开沟打孔与开沟打孔灌沙处理。12月5日进行冬灌前土壤取样,12月10日进行冬灌,灌水量3 150 m³/hm²,于2022年1月10日进行冬灌后土壤取样。2022年11月28日进行灌前土壤取样,12月2日进行冬灌,灌水量3 150 m³/hm²,于2023年1月2日进行冬灌后土壤取样。

1.4 测定项目与方法

1)土壤含水率。深翻(G1)和打孔(G2)处理采用全进口土壤墒情监测系统(德国ADCON公司生产的A760遥测数采和美国STEVENS WATER公司生产的Hydra Probe Lite土壤参数传感器)进行数据自动采集与传输,传感器安装深度0~100 cm,每10 cm安装1个,共10个。打孔灌沙(G3)、开沟(G4)、开沟打孔(G5)、开沟打孔灌沙(G6)和对照(CK)处理采用烘干法进行土壤含水率的测定。

2)土壤电导率。深翻(G1)和打孔(G2)处理土壤盐分监测同本文1.4中1)土壤含水率,采用土壤墒情监测系统数据自动采集与传输。打孔灌沙(G3)、开沟(G4)、开沟打孔(G5)、开沟打孔灌沙(G6)和对照(CK)处理采用电导率法测定,先用土钻进行取样,取样深度100 cm,每20 cm为1层,每层取湿土50 g,风干后过孔径1 mm的土筛称取20 g置于容积为250 mL的三角瓶中,按照土水质量比1:5加入100 mL蒸馏水,在振荡机上振荡15 min,再静止30 min后进行过滤,用DDSJ-308A型电导率仪测定浸提液电导率。

3)土壤脱盐率。脱盐率是指试验小区土壤盐分

含量的减小值占初始值的百分比,可以评价淋洗和暗管协同作用下土壤层的脱盐效果^[19-20],土壤脱盐率计算公式为:

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, N 为土壤脱盐率,%; S_1 为冬灌前土壤含盐量,g/kg; S_2 为冬灌后土壤含盐量,g/kg。

处理措施相对于对照处理的相对脱盐率计算公式为:

$$D_R = (D_G - D_{CK}) / D_{CK} \quad (2)$$

式(2)中, D_R 为相对脱盐率; D_{CK} 为对照处理脱盐率,%; D_G 为处理措施脱盐率,%。 $D_R > 0$ 为相对脱盐, $D_R < 0$ 为相对积盐, D_R 值越大,脱盐效果越好。

1.5 数据处理

采用WPS整理与分析试验数据,应用Origin 2021作图。

2 结果与分析

2.1 改良措施对土壤含水率的影响

不同改良措施下,2020年冬灌前后土壤含水率变化如图1A所示。从图1A中可以看出,不同改良措施中,G1处理由于对试验区1 m深度土层进行了均匀翻动,土壤含水率随着深度的增加呈递增趋势;在0~20 cm土层含水率最小,为16.4%;80~100 cm土层含水率最大,为22.6%。G2处理和CK处理的土壤含水率表现出一致的变化规律,均呈现出随着土层的增加含水率先增大再减小的变化趋势,其中在60~80 cm土层深度上最大,含水率分别为25.1%和26.5%,之后在80~100 cm土层含水率显著降低,分别为22.0%和20.1%。2020年冬灌后各处理在不同深度上土壤含水率差异明显,其中在0~80 cm深度,G1处理含水率最小,其次是G2处理,CK处理最大。在80~100 cm深度,3个处理含水率均减小,但CK处理减小的幅度最大,G2居中,G1最小。综合2020年冬灌前后各处理土壤含水率变化,G1、G2和CK 3个处理在冬灌前平均含水率分别为20.0%、20.8%和21.9%,冬灌后平均含水率分别为21.6%、25.1%和27.2%,土壤含水率综合表现为CK>G2>G1。

2021年不同处理冬灌前后土壤含水率变化如图1B所示,2021年在2020年G1、G2和CK 3个处理的基础上新增了G3、G4、G5和G6处理。在不同年份表现上,G1、G2和CK 3个处理2020年与2021年灌水前后的土壤含水率变化规律一致,G3、G4、G5和

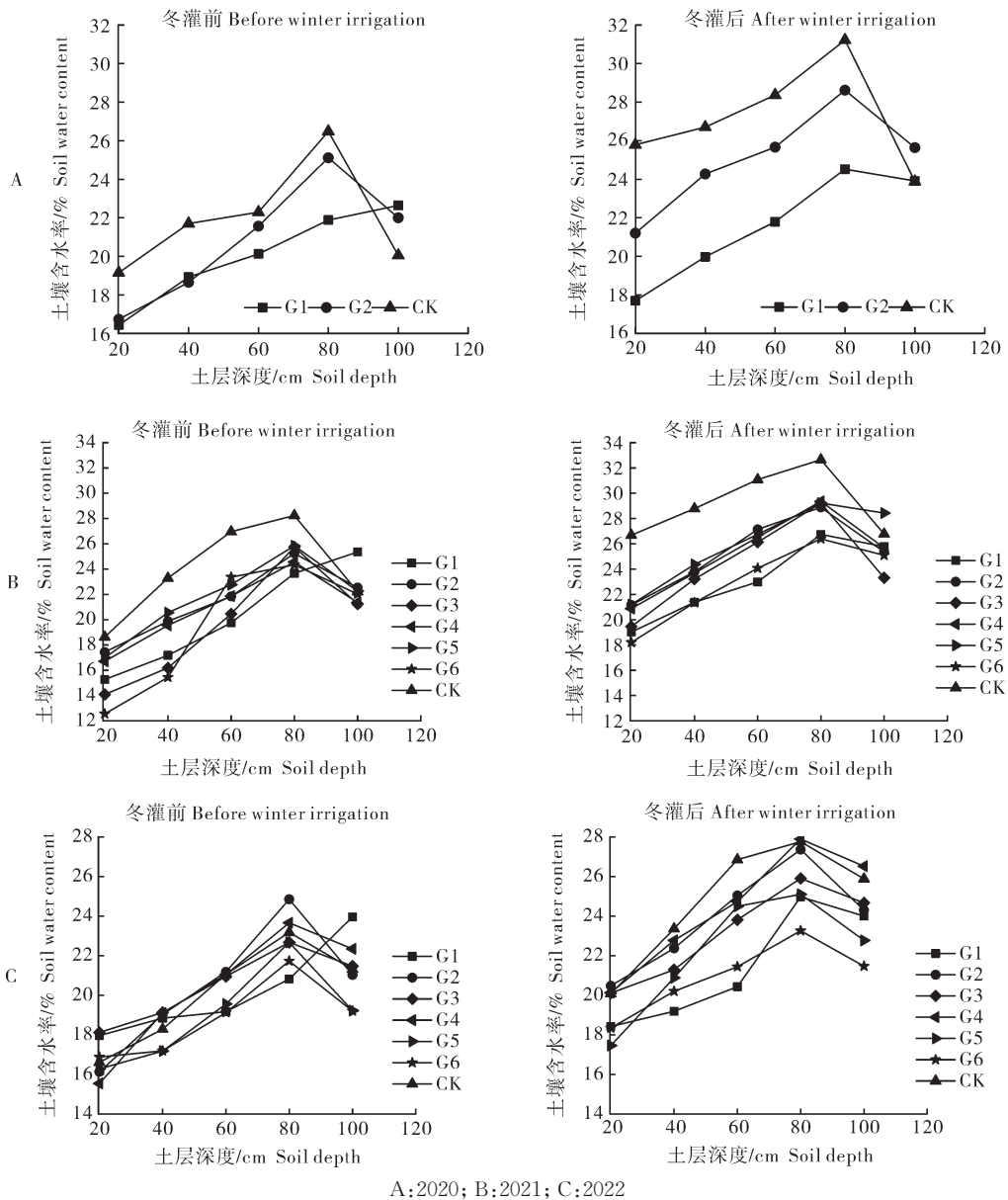


图1 不同年份冬灌前后不同措施土壤含水率变化

Fig.1 Changes in soil moisture content before and after winter irrigation in different years under different measures

G6处理灌水前后的土壤含水率与G2和CK处理2020年和2021年变化规律均一致,且冬灌前和冬灌后均为CK处理的土壤含水率最大,各处理2021年冬灌前和冬灌后平均含水率分别为19.5%~23.9%和23.3%~28.4%。不同土层深度上,各处理均在0~20 cm表层的含水率最小,冬灌前和冬灌后分别为12.5%~18.6%和18.2%~26.7%。含水率随着土层深度的增加而增大,在60~80 cm处达到最大值,冬灌前和冬灌后为23.7%~28.2%和26.4%~32.7%。在80~100 cm土层深度,含水率下降明显,平均在21.3%~25.4%和23.3%~28.4%。

2022年不同措施冬灌前后土壤含水率变化如图1C所示,各处理冬灌前与冬灌后不同深度含水率变化规律与2021年基本一致,即冬灌前和冬灌后各处理含水率分别为15.5%~24.9%和17.5%~27.9%,100 cm土层平均含水率分别为18.8%~20.5%和20.9%~24.4%。不同土层深度上,各处理冬灌前和冬灌后均为0~20 cm表层的含水率最小,冬灌前和冬灌后分别为15.5%~18.1%和17.5%~20.5%。含水率随着土层深度的增加而增大,在60~80 cm处达到最大值,冬灌前和冬灌后分别为20.8%~24.9%和23.3%~27.9%。在80~100 cm土层深度,含水率呈下降趋势,分别为19.2%~25.4%和23.3%~28.4%。

冬灌后各处理 0~100 cm 土壤含水率综合表现为 CK (24.79%) > G4 (24.41%) > G2 (23.91%) > G3 (23.15%) > G5 (22.14%) > G1 (21.4%) > G6 (20.94%)。

不同年份间含水率在冬灌前和冬灌后均表现出一致的变化规律,在冬灌前,除 G1 处理外,其他各处理均在 0~80 cm 土层随着土层深度的增加呈增大趋势,且在夹层位置 60~80 cm 达到最大值,随后在 80~100 cm 深度含水率减小。在冬灌后,各处理含水率在不同年份间的变化规律相似,均在夹层土壤上方随深度增加而增大,在夹层土壤下方降低,且各处理在 0~60 cm 深度的含水率波动均明显大于 60~80 和 80~100 cm,这初步说明,由于 60~80 cm 夹层的存在,对土壤含水率的变化有较大影响,且对上层 0~60 cm 深度的含水率影响较大,其影响随着深度的增加而减小,且水分经过夹层向下渗的速率减缓,因此,夹层以下土壤含水率变化相对较小。同时,通

过冬灌,土壤在经过 1 个冬休期后,含水率相比冬灌前均有提高,如 2020 年 3 个处理冬灌后平均含水率为 24.6%,相比冬灌前提高了 3.7%,同理,2021 年和 2022 年冬灌后土壤平均含水率比冬灌前分别提高了 4.2% 和 3.1%。不同处理相比,CK 处理在 3 次冬灌前后的土壤含水率均处于较高水平,而 G1 处理则处于较低水平,表明通过采取打破夹层土壤的措施后,改变了原有土壤的物理特征,从而对土壤整体含水率大小与分布情况产生了影响。

K-S 检验显示,2020—2022 年各处理土壤水分统计特征值服从正态分布(偏度系数与峰度系数越小,表明越接近正态分布),变异系数越大,表明对水分的影响程度越大,2020 年和 2021 年中各改良处理的变异程度均大于对照处理。2022 年,各处理中仅 G6 处理为弱变异,系数为 0.09,而其他处理均为中等变异,系数在 0.10~0.14。

表 2 不同年份各处理土壤水分特征值

Table 2 Desalination rate of different soil layers under different treatments									
年份 Year	处理 Treatments	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test
2020	G1	17.69	24.52	21.58	2.82	0.13	-0.46	-1.31	0.20
	G2	21.20	28.62	25.08	2.69	0.11	-0.30	1.21	0.21
	CK	23.88	31.22	27.19	2.78	0.10	0.54	0.21	0.17
2021	G1	19.02	26.74	23.18	3.16	0.14	-0.20	-1.55	0.19
	G2	21.16	28.88	25.26	2.99	0.12	-0.29	-0.58	0.14
	G3	19.45	29.21	24.26	3.64	0.15	0.12	0.14	0.20
	G4	20.88	29.36	25.23	3.17	0.13	-0.17	0.13	0.16
	G5	21.20	29.22	25.99	3.26	0.13	-0.79	-0.49	0.19
	G6	18.20	26.39	23.02	3.27	0.14	-0.81	-0.41	0.23
	CK	26.68	32.65	29.19	2.64	0.09	0.41	-2.08	0.22
2022	G1	18.42	24.97	21.40	2.92	0.14	0.41	-2.68	0.23
	G2	20.48	27.36	23.91	2.62	0.11	-0.03	-0.38	0.16
	G3	20.11	25.90	23.16	2.40	0.10	-0.31	-1.94	0.21
	G4	20.13	26.89	24.21	2.81	0.12	-0.74	-0.72	0.20
	G5	17.46	25.10	22.14	3.09	0.14	-0.92	0.09	0.18
	G6	18.34	23.26	20.94	1.82	0.09	-0.37	0.60	0.21
	CK	20.08	27.76	24.79	3.10	0.13	-0.99	0.00	0.24

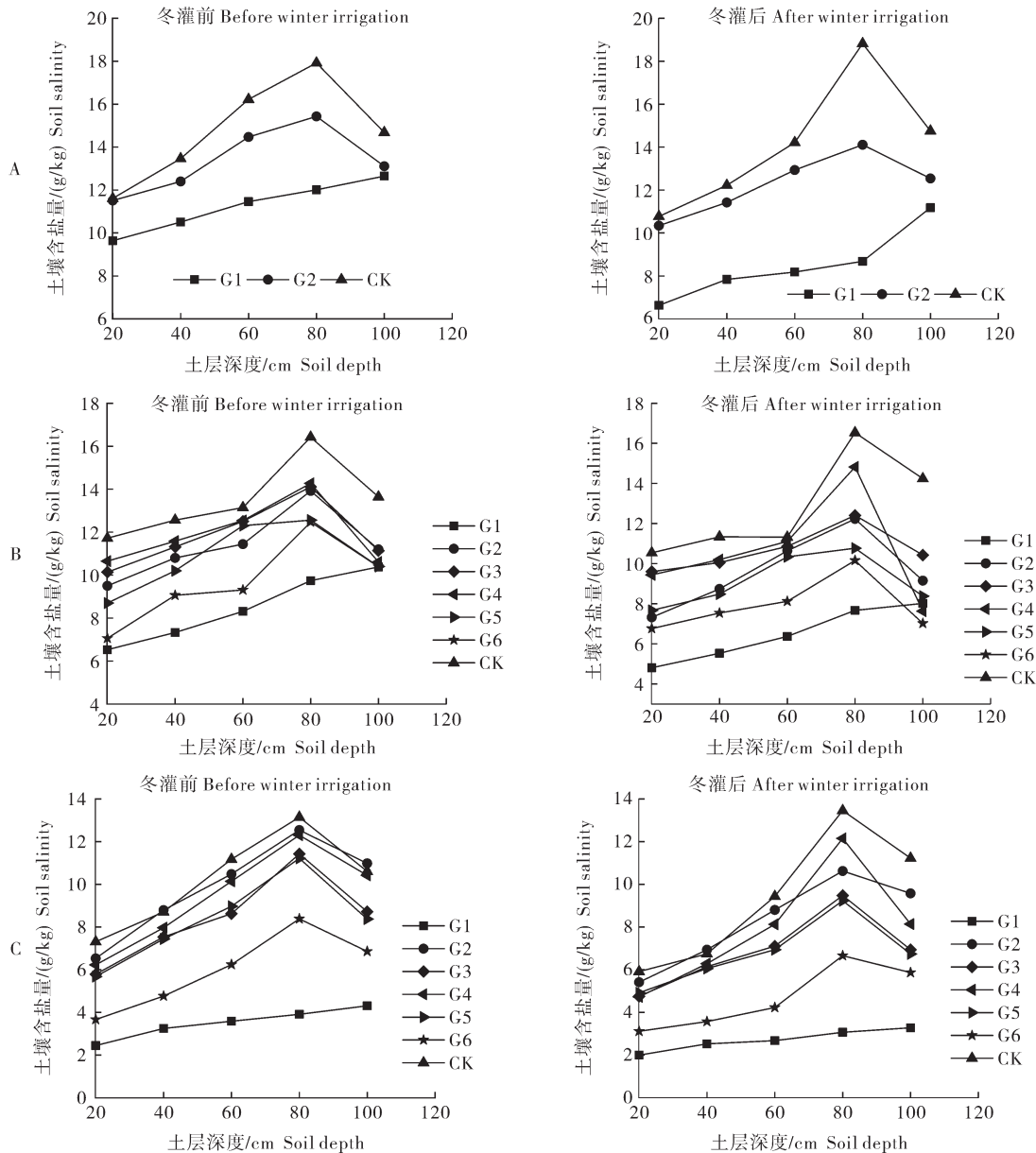
2.2 改良措施对土壤盐分的影响

2020—2022 年不同处理冬灌前和冬灌后土壤盐分变化如图 2 所示。从图 2 A 可以看出,冬灌前各处理土壤盐分随深度变化与含水率变化规律类似,其中 G1 处理随深度增加呈逐渐增大趋势,0~20 和 80~100 cm 土层含盐量分别为 9.64 和 12.65 g/kg。G2 和 CK 处理随深度增加呈先增大后减小的趋势,

0~20 cm 表层的盐分含量最低,为 11.51 和 11.61 g/kg; 60~80 cm 土层盐分含量最高,为 15.43 和 17.92 g/kg; 80~100 cm 土层含盐量为 13.11 和 14.68 g/kg; 在各深度上的土壤盐分均表现为 CK>G2>G1, 总体上看, G1、G2 和 CK 处理在 0~100 cm 土层土壤平均含盐量为 11.25、13.39 和 14.78 g/kg。冬灌后各处理土壤盐分变化规律与冬灌前

一致,表现为 $CK>G_2>G_1$,平均土壤含盐量分别为14.15、12.27和8.5 g/kg。与冬灌前相比, G_1 、 G_2 和CK处理冬灌后平均含盐量分别降低了24.5%、

8.4%和4.2%,其中0~20 cm表层的土壤含盐量分别为6.63、10.34和10.77 g/kg,比冬灌前降低了31.3%、10.2%和7.3%。



A:2020; B:2021; C:2022.

图2 不同年份冬灌前后不同措施土壤含盐量变化

Fig.2 Changes in soil salt content before and after winter irrigation in different years under different measures

不同处理2021年土壤含盐量冬灌前与冬灌后的变化规律一致(图2B),除 G_1 处理土壤含盐量随土层深度增加而增大,其他各处理总体表现为随深度增加先增大后减小的趋势,均在60~80 cm处土壤含盐量最大。 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 和CK处理冬灌后较冬灌前0~100 cm土层平均含盐量分别降低了1.98、1.76、1.17、1.29、1.70、1.74和0.7 g/kg,2022年冬灌前后各处理土壤盐量变化如图2C所示,冬灌前

和冬灌后各处理在不同土层深度的含盐量变化规律一致,各处理中除 G_1 处理外,其他处理均在60~80 cm处含盐量最大,且均在0~100 cm土层整体表现为脱盐。 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 和CK处理冬灌后较冬灌前0~100 cm土层平均含盐量分别降低了0.79、1.59、1.53、1.52、1.56、1.29和0.83 g/kg。说明采用改良措施后较常规处理可以降低冬灌后土壤含盐量。

综合不同年份冬灌前后不同改良措施土壤含水率变化可以看出, G1、G2 和 CK 处理经过 2020—2022 年 3 次冬灌后, 土壤含盐量下降明显, 其中 G1 和 G2 处理平均土壤含盐量由 2020 年冬灌前的 11.25 和 13.39 g/kg 降到 2022 年冬灌后的 2.71 和 8.27 g/kg, 分别降低了 8.54 和 5.12 g/kg, 其中在 0~20 cm 土层降幅最大, 为 7.64 和 6.09 g/kg。CK 处理在 3 次冬灌后总体上平均含盐量由 14.78 g/kg 降低到 9.35 g/kg, 降幅为 36.7%。G3、G4、G5 和 G6 处理在经过 2 次冬灌后, 2022 年冬灌后土壤平均含盐量较 2021 年冬灌前土壤含盐量降低了 4.48、4.04、4.05 和 4.97 g/kg, 且在 0~40 cm 土壤含盐量降低明显, 冬灌后土壤含盐量分别为 5.45、5.51、5.49 和 3.34 g/kg, 结果显

示, 各处理措施在通过 2 次冬灌后表层盐分已由中重度盐渍化降到轻度盐渍化水平, 而 CK 处理在 3 次冬灌后仍处于中度偏重盐渍化水平。表明通过不同夹层处理措施后能有效降低土壤含盐量, 并使表层含盐量显著降低。

2020—2022 年各处理生育期土壤盐分统计特征值服从正态分布(表 3), 从变异系数上看, 各处理盐分的变异强度高于水分, 在 3 a 中均为中等变异, 且 CK 处理在不同年份中均处于较高水平, 如在 2020 年最大、在 2021 年仅低于 G1 和 G4 处理、在 2022 年仅低于 G4 处理。各改良处理中以 G4、G1 和 G6 的变异系数较大, 表明相比其他改良处理, 这 3 种处理对土壤盐分的影响更大。

表 3 不同年份各处理土壤盐分特征值

Table 3 Desalination rate of different soil layers under different treatments

年份 Year	处理 Treatments	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 CV	偏度 S kewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test
2020	G1	6.63	11.18	8.50	1.68	0.20	1.09	2.10	0.26
	G2	10.34	14.11	12.27	1.44	0.12	-0.17	-0.51	0.18
	CK	10.77	18.82	14.15	3.05	0.22	0.82	0.89	0.22
2021	G1	4.81	8.02	6.48	1.37	0.21	-0.03	-2.22	0.21
	G2	7.32	12.23	9.62	1.88	0.20	0.38	-0.37	0.20
	G3	9.60	12.41	10.67	1.08	0.10	1.26	1.83	0.23
	G4	7.63	14.82	10.64	2.66	0.25	0.97	1.67	0.23
	G5	7.67	10.77	9.13	1.35	0.15	0.41	-2.54	0.29
	G6	6.76	10.16	7.92	1.36	0.17	1.49	2.22	0.24
	CK	10.54	16.53	12.79	2.52	0.20	0.97	-0.75	0.32
2022	G1	2.00	3.28	2.71	0.50	0.18	-0.47	-0.30	0.16
	G2	5.42	10.62	8.27	2.09	0.25	-0.47	-1.22	0.20
	G3	4.76	9.48	6.89	1.72	0.25	0.61	1.40	0.25
	G4	4.73	12.15	7.89	2.78	0.35	0.82	1.18	0.26
	G5	4.92	9.23	6.78	1.58	0.23	0.84	1.65	0.26
	G6	3.12	6.66	4.69	1.52	0.32	0.47	-2.16	0.22
	CK	5.91	13.45	9.35	3.12	0.33	0.23	-1.66	0.20

2.3 改良措施对土壤脱盐效果的影响

不同处理措施土壤脱盐效果如表 4 所示, 从不同年份上看, 在 2020 年 3 个处理中, G1 处理的脱盐率明显高于 G2 和 CK 处理, G1、G2 和 CK 的脱盐率分别为 24.93%、8.34% 和 4.67%。2021 年各处理措施中, G1 处理显著高于其他 6 个处理, 脱盐率为 23.65%; 其次是 G6(16.93%) 和 G3(15.90%) 处理; 随后依次是 G5(15.66%)、G4(11.62%) 和 G2(9.6%) 处理, CK 处理的脱盐率最低, 为 5.2%。2022 年冬灌后, 各处理中 G1 脱盐率最大, 为

22.25%; CK 处理的脱盐率最低(9.8%); 其他处理脱盐率在 16.45%~21.47%。通过 3 次冬灌后各处理土壤脱盐效果明显, 其中 G1 和 G2 处理平均土壤含盐量由 2020 年冬灌前的 11.25 和 13.39 g/kg 降到 2022 年冬灌后的 2.71 和 8.27 g/kg, 脱盐率为 75.9% 和 38.2%, CK 处理由第 1 次冬灌前的 14.78 g/kg 降低到第 3 次冬灌后的 9.35 g/kg, 脱盐率为 36.7%。G3、G4、G5 和 G6 处理由 2021 年冬灌前到 2022 年冬灌后, 脱盐率分别为 39.4%、33.9%、37.4% 和 51.4%, 同时, 通过对比发现, G3 和 G6 处理虽然只

经过 2 次冬灌,但脱盐率优于经过 3 次冬灌的 G2 处理, G5 与 G2 的脱盐率相差较小且略高于 CK 处理,说明除去 G1 处理采取整体土壤搅拌的措施,打孔灌沙(G3)和开沟打孔灌沙(G6)措施相比其他措施更利于土壤脱盐,表明通过深翻、打孔与灌沙等措施后,能显著提高重盐碱地脱盐率。

表 4 不同处理各土层脱盐率

Table 4 Desalination rate of different soil layers under different treatments							%
处理 Treatments	年份 Year	土层深度/cm Soil depth					平均脱盐率 Average desalting rate
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
G1	2020	31.28	25.39	28.62	27.73	11.62	24.93
	2021	26.38	24.60	23.31	21.25	22.74	23.65
	2022	18.28	22.03	25.43	21.61	23.90	22.25
	平均值 Mean	25.31	24.00	25.79	23.53	19.42	23.61
G2	2020	10.20	7.93	10.66	8.57	4.36	8.34
	2021	5.31	11.11	13.13	12.06	6.37	9.60
	2022	17.09	21.08	16.02	15.30	12.80	16.46
	平均值 Mean	10.87	13.37	13.27	11.98	7.84	11.47
G3	2021	22.78	19.33	6.99	12.13	18.27	15.90
	2022	17.82	18.49	17.61	17.04	20.37	18.27
	平均值 Mean	17.16	17.06	12.62	13.71	15.49	17.08
G4	2021	20.78	20.53	11.40	-3.85	9.25	11.62
	2022	24.10	21.09	19.84	1.22	21.87	17.62
	平均值 Mean	20.68	19.56	14.62	3.69	15.54	14.62
G5	2021	11.84	16.86	15.93	14.23	19.42	15.66
	2022	13.35	18.56	22.65	17.72	19.56	18.37
	平均值 Mean	15.29	18.33	17.74	11.88	18.17	17.01
G6	2021	4.19	16.74	12.75	18.54	32.40	16.93
	2022	15.04	25.07	32.20	20.53	14.48	21.47
	平均值 Mean	11.51	20.05	20.89	16.99	21.69	19.20
CK	2020	7.25	9.21	12.41	-5.03	-0.47	4.67
	2021	10.09	9.69	13.85	-0.68	-4.40	5.71
	2022	19.09	22.56	15.57	-2.37	-5.84	9.80
	平均值 Mean	12.14	13.82	13.94	-2.70	-3.57	6.73

试验期内,2021 年 G1、G2 和 CK 处理不同土层深度脱盐率与 2020 年和 2022 年变化规律一致,因此,选择 2021 年不同处理措施不同深度土壤脱盐率进行分析, G1 处理各土层土壤脱盐率差异较小,在 0~20 cm 表层脱盐率最大,为 26.38%,随后逐渐减小, 20~80 cm 土层在 21.25%~24.60%, 80~100 cm 土层脱盐率为 22.74%,由于 G1 采用了对 0~100 cm 土层的整体均匀翻动,改变了深层尤其是夹层的土壤物理特性,使其土壤水盐运移特征发生变化,形成与其他措施不一样的盐分运动特征。CK 处理由于未采用任何改良措施,各土层盐分变化较大,在 0~60 cm 脱盐率在 9.69%~13.85%,而在 60~100 cm 处

于积盐状态,积盐率为 -0.68% 和 -4.40%,这是因为对照处理 60~80 cm 处夹层土壤的黏粒特性,土壤通透性与渗透性差,导致灌溉水入渗较慢,上层盐分随水运动到该层时速率减缓,从而形成一定时段内的积盐。与此规律类似的处理为 G4, G4 处理在表层的脱盐率最大(20.78%),之后随深度增加而减小,在 60~80 cm 土层表现为积盐(-3.85%), 80~100 cm 土层表现为脱盐(9.25%),这可能是由于沟的间距较大(6~8 m),取样点在试验区中心位置,因此,灌水后离沟距离近的水向下渗较快,而离沟远的位置则入渗较慢,从而在夹层位置上的水盐运动与 CK 处理相似。综合 3 次冬灌后的脱盐效果,脱盐率由大到小分

别为G1>G6>G3>G2>G5>CK>G4。

2.4 改良措施对夹层土壤脱盐效果的影响

在不同改良措施下,2~3次冬灌后各处理夹层位置土壤脱盐率与相对脱盐率如图3所示,各处理在夹层位置60~80 cm土层深度脱盐率G1处理明显高于其他处理,脱盐率为74.4%,其次是G6处理,为46.6%,随后分别是G3(31.9%)、G2(31.2%)、G5(26.5%)、CK(24.9%),G4处理的脱盐率最低,仅为14.9%。各处理中相对脱盐率仅G4处理为负值(-0.4),其他处理在0.1~2.0。G1、G6和G3处理在夹层位置的脱盐率高于其他处理,在整个0~100 cm土层的平均脱盐率也优于其他处理,说明对于在重盐碱土壤含夹层的情况下,脱盐主要就是夹层土壤位置的脱盐,结果表明,采用G1、G6和G3处理改良措施可有效促进夹层位置土壤脱盐,对重盐碱地夹层土壤改良具有较好的改良效果。

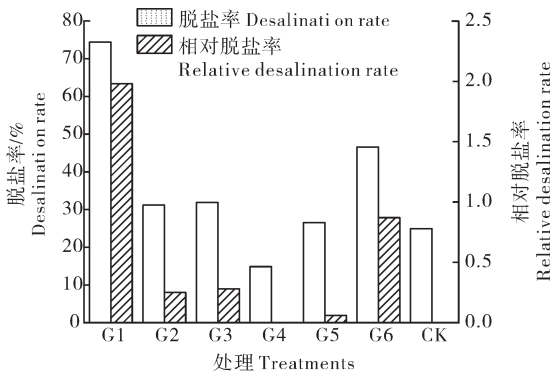


图3 不同处理夹层土壤脱盐效果对比
Fig.3 Comparison of desalination effects of different treatments on interlayer soil

2.5 土壤含水率增量与盐分增量之间的关系

对冬灌后水盐变化关系进行分析(图4)显示,灌水后各处理在夹层60~80 cm深度土壤盐分增量与含水率增量间存在显著的相关关系($R^2=0.933, P<0.05$),表现为盐分增量随含水率增量的增大而减小,各处理土壤盐分增量的变化规律与前面所述的脱盐率一致,即脱盐率越大,夹层处盐分增量越大,对应的含水率增量越小,反之,夹层处盐分增量越小,所对应的含水率增量则越大,如2021年G1处理盐分增量为2.07 g/kg,含水率增量为3.1%,而CK处理盐分增量为-0.11 g/kg,而含水率增量为4.4%,这是由于层状土中的黏土夹层对水盐运移具有阻滞作用^[23],夹层土壤中的水分下渗缓慢,随着水分的累积,盐分也随着累积,从而形成盐分增量与含水率增量成反比的关系,进一步表明夹层土壤对水盐运动的阻滞作用。

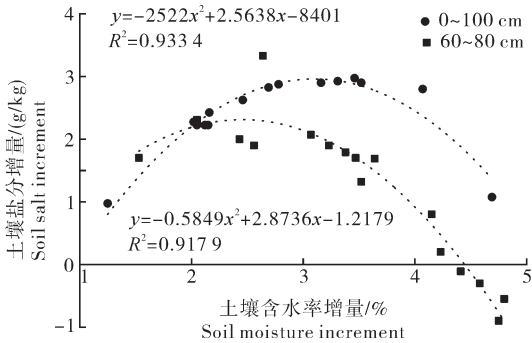


图4 土壤盐分变化量与含水量变化量间的关系
Fig.4 The relationship between changes in soil salinity and changes in soil moisture content

3 讨论

在新疆针对盐碱地多采用冬春大水漫灌的方式进行盐分淋洗,受南北疆气象、地理等因素影响,冬春灌定额有所差异,如在北疆玛纳斯河流莫索湾灌区的冬灌定额为2 800 m³/hm²^[24],南疆开孔河流域适宜的冬灌定额为3 600 m³/hm²^[25],本研究采用渭干河灌区普遍的冬灌定额3 150 m³/hm²,但常规盐碱地冬灌淋洗效果与张瀚等^[25]结果有较大差异,这主要是由于试验区土壤夹层的阻水抑盐作用导致冬灌淋洗效果并不明显,2020—2022年3次冬灌后常规对照处理的脱盐率为36.7%。基于夹层土壤的理化特性,对夹层位置^[26]、深度^[3-4]等影响因素的水分入渗特征进行模拟分析,结果表明,夹层土壤可阻碍水分运移与降低水分入渗速率,入渗率随夹层深度的增加呈现先增加后减小的变化趋势^[26],董倩倩等^[4]通过不同灌水量试验,结果表明,夹心结构中水分入渗速率减缓且入渗时间延长,可使耕作层土壤含水率提高22.5%~29.3%,王晓彤等^[26]对在不同位置设置夹层后的土壤水分入渗特性与含水率分布进行分析,结果显示,入渗率规律与前者一致,且说明当夹层位置在60 cm深度时,更接近普通农田的土壤水分入渗特性,本研究与此夹层深度一致,冬灌前各改良措施中深翻处理与其他各处理的土壤含水率变化规律明显不同,冬灌前由于深翻后,土壤呈均匀状态,水分在重力作用下下渗,呈随深度增加而增大的变化规律,而冬灌后同样在夹层处出现变化,即各处理均表现为随深度增加呈先增大后减小的变化趋势,由于夹层土壤水分入渗慢,对照处理与改良处理措施的平均含水率差异较明显,其中常规对照处理的平均含水量在2020、2021和2023年3次冬灌前后均高于其他处理,冬灌后可能是因为深翻措施并未将

夹层土壤进行置换,仅是均匀翻动,在灌水后,由于土质物理结构与夹层土壤的黏粒特性,在水的作用下逐渐下移,从而在80~100 cm处表现出了与其他处理措施一致的变化规律,通过改良措施促进了灌溉后水分的下渗,加快水分下移,但夹层处土壤含水率变化与前人研究一致,即夹层处含水率最大,CK处理在2020年冬灌后分别比G1、G2处理高21.4%和8.3%,在2021和2022年分别比各处理措施高出10.1%~19.2%和1.4%~16.2%,也表明改良措施能有效促进夹层土壤的水分下渗。

与张翼夫等^[16]打孔灌沙、龚嘉等^[27]粉垄深耕结合开沟排水、尹志荣等^[28]覆沙与张宇航等^[29]掺沙等措施的研究方法类似,本研究采用深翻、打孔、打孔灌沙等措施,打孔与灌沙措施不仅能促进水分下渗,同时还可以提高土壤脱盐率,如开沟打孔灌沙(G6)因为采用了开沟和打孔灌沙措施,将不含盐分的粗沙灌满整个孔,由于沙粒与原土壤接触面及沙粒与沙粒间大量的大孔隙,结合开沟后形成的2 m深均匀翻动土层,使灌溉后土壤水盐可以通过孔隙下渗至深层,产生较好的脱盐效果,各土层深度上均表现为脱盐,2年平均脱盐率为19.2%,且在80~100 cm土层脱盐率最大,为21.7%。打孔灌沙(G3)处理的整体脱盐率仅次于G6处理,2次冬灌平均脱盐率为17.1%,土壤表层0~20 cm脱盐率最大,为17.2%,之后随深度增加呈先减小再增大变化,脱盐率在12.6%~17.1%。随后是开沟打孔(G5)处理,在20~40 cm土层脱盐率最大(18.3%),平均脱盐率为17.0%。G1处理在各土层的脱盐率均优于其他各处理,其中40~60 cm脱盐率最大,为25.8%,其次是表层0~20 cm(25.3%),土壤平均脱盐率为23.6%。各处理中夹层位置土壤脱盐率相对较低,为3.7%~23.5%,而CK处理在3次冬灌后均处于积盐状态,3a平均积盐率为2.7%。这表明增加夹层处理措施能更好提高脱盐效果;同时,在改良措施下,经过多次冬灌后的效果更明显,如深翻0~20 cm表层含量由2020年冬灌前的9.64 g/kg降到2022冬灌后的2.0 g/kg,即由重盐化土改良为轻度盐化土。G2处理表层0~20 cm由2020年冬灌前的11.51 g/kg降到2022冬灌后的5.4 g/kg,脱盐率为53.1%,而G6和G3处理只经过2次冬灌,表层0~20 cm脱盐率达到55.8%和53.1%,表明夹层改良措施对土壤脱盐作用显著。

本研究以渭干河灌区在规模化高效节水建设后

发现的大面积重盐碱地夹层土壤为研究对象,通过大田试验,研究不同改良措施对重盐碱地夹层土壤的脱盐效果,结果显示,各改良处理2020—2022年冬灌后平均含水率分别比CK处理低7.8%~20.6%、11.0%~21.2%和2.3%~13.6%。G1处理的脱盐效果最好,3次灌水后的脱盐率为75.9%,其他改良处理的脱盐率为33.9%~51.5%,CK处理最低,仅为36.7%。同时,CK处理夹层位置含水率与盐分均高于各改良处理。表明采用改良措施后,随着冬灌年限的增加,脱盐效果越好,且打孔灌沙措施相比深翻措施在经济投入上更具优势与可行性。

综上,在现有盐碱土改良措施中,尽管暗管排水^[30-31]、深耕^[32-33]、施用改良剂^[34-35]、开沟排水^[27]等排盐效果理想,但工程量较大且生产成本低,南疆受水资源与经济发展等因素制约,在盐碱地改良措施中以低成本和利于规模化应用推广为主,因此,本研究在总结前人研究成果^[2,8,20-22]的基础上,探索打孔与灌沙措施的应用效果,结果表明,深翻和开沟措施经过2次冬灌后洗盐效果明显,并能抑制土壤表层返盐,而本研究的目的主要是在大面积进行深翻和开沟不现实的情况下探索打孔灌沙措施是否能起到洗盐和抑制返盐的效果,结果表明打孔灌沙措施可以作为一种简单实用的措施来提高盐碱地的洗盐效果与抑制返盐,由于目前仅经过2次冬灌,重盐碱地的脱盐效果并不能全面呈现,后续将对打孔灌沙密度、打孔间距对土壤水盐运动的影响以及夹层土壤水盐迁移特征等进一步进行系统的研究。

参考文献 References

- [1] 毛海涛,黄庆豪,龙顺江,等.土壤盐渍化治理防护毯的研发及试验[J].农业工程学报,2015,31(17):121-127.MAO H T, HUANG Q H, LONG S J, et al. Design and experiment of protective blanket for soil salination control[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 121-127 (in Chinese with English abstract).
- [2] 迪力努尔·阿布拉,黄建,祁通,等.粉垄深松破障对新疆盐碱地土壤洗盐脱盐效果[J].新疆农业科学,2020,57(9):1754-1761.DILINUR A, HUANG J, QI T, et al. Study on the effect of washing and desalting of soil in saline-alkali land of Xinjiang by the breaking of the barrier by the deep pine ridge[J]. Xinjiang agricultural sciences, 2020, 57(9): 1754-1761 (in Chinese with English abstract).
- [3] 魏建涛,张建新,范文波,等.犁底层深度对膜下滴灌土壤水盐运移影响的模拟研究[J].土壤通报,2021,52(4):845-853.WEI J T, ZHANG J X, FAN W B, et al. Ef-

- fect of the plough bottom depth on the soil water and salt transport under mulched drip irrigation[J]. Chinese journal of soil science, 2021, 52(4): 845-853 (in Chinese with English abstract).
- [4] 董倩倩, 许忠宇, 范文波, 等. 夹心结构水盐运移及分布规律[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(4): 419-425. DONG Q Q, XU Z Y, FAN W B, et al. Soil water-salt transport and distribution characteristics in sandwich structure[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021, 39(4): 419-425 (in Chinese with English abstract).
- [5] LEMON E R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss[J]. Soil Science Society of America journal, 1956, 20(1): 120-125.
- [6] MILLER D E, GARDNER W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America journal, 1962, 26(2): 115-119.
- [7] WILLIS W O. Evaporation from layered soils in the presence of a water table[J]. Soil Science Society of America journal, 1960, 24(4): 239-242.
- [8] 杨鹏年, 周金龙, 崔新跃. 内陆干旱区竖井灌排下土壤盐分的运移特征: 以哈密盆地为例[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 148-150. YANG P N, ZHOU J L, CUI X Y. The transport characteristics of soil salt after shaft well irrigation and drainage in arid and inland area: a case study of Hami Basin[J]. Research of soil and water conservation, 2008, 15(2): 148-150 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 农田排水改良盐渍化土壤效果与环境污染研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 372-385. DOU X, SHI H B, LI R P, et al. Effect of farmland drainage on improving saline soil and environmental pollution[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(4): 372-385 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 209-212. LÜ D Q, SHAO M A, PAN Y. Dependent relationship between bulk density changes and soil water characteristics[J]. Journal of soil and water conservation, 2009, 23(3): 209-212 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吕擎峰, 单小康, 赵彦旭, 等. 土层结构对非饱和毛细水盐运移的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 99-105. LÜ Q F, SHAN X K, ZHAO Y X, et al. Influence of soil layer structure on unsaturated capillary water and salt transport[J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2021, 32(4): 99-105 (in Chinese with English abstract).
- [13] CHEN S, MAO X M, SHUKLA M K. Influence of coarse-textured soil layers under crop root zone on soil water and salt dynamics and crop yield in shallow groundwater areas[J]. Soil Science Society of America journal, 2021, 85(5): 1479-1495.
- [14] 许尊秋, 毛晓敏, 陈帅. 层状土层序排列对水分运移影响的室内土槽试验[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 59-62. XU Z Q, MAO X M, CHEN S. Tank experiment on the influence of the sequence alignment on water movement in multi-layered soil[J]. China rural water and hydropower, 2016(8): 59-62 (in Chinese with English abstract).
- [15] 马蒙蒙. 层状土壤中水流和溶质运移特征及数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2020. MA M M. Characteristics and numerical simulation of water flow and solute transport in layered soil[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张翼夫, 李洪文, 胡红, 等. 打孔灌沙促进漫灌下盐碱土水分下渗提高脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 76-83. ZHANG Y F, LI H W, HU H, et al. Punching and filling sand method increasing water infiltration and desalting rate of saline-alkali soil under flooding irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 76-83 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马德海, 张新民, 吴婕, 等. 粘土夹层盐碱地土壤竖孔排盐改良技术试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 51-54. MA D H, ZHANG X M, WU J, et al. Research of stand-hole drainage salinity technology for the saline-alkali soil with clay interlayer[J]. Journal of irrigation and drainage, 2007, 26(5): 51-54 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李志刚, 叶含春, 肖让. 少免冬春灌对棉田非生育期土壤水盐分布的影响[J]. 节水灌溉, 2014(12): 10-15. LI Z G, YE H C, XIAO R. Influence of less & free of winter and spring irrigation on soil water and salt distribution in cotton non-growth period[J]. Water saving irrigation, 2014(12): 10-15 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李文娟, 虎胆·吐马尔白, 杨鹏年, 等. 不同春灌水量对不同盐度棉田盐分运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2014(4): 7-10. LI W J, HUDAN T, YANG P N, et al. Influence of different spring irrigation scheduling on moisture and salinity change rules in cotton field with different salinity[J]. Water saving irrigation, 2014(4): 7-10 (in Chinese with English abstract).
- [20] 衡通, 何新林, 杨丽莉, 等. 暗管与竖井排水工程改良新疆盐渍土的设计与效果评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 111-118. HENG T, HE X L, YANG L L, et al. Design and effect evaluation of subsurface pipe and vertical shaft drainage project to improve saline soil in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(21): 111-118 (in Chinese with English abstract).
- [21] 夏婷, 杨建国, 魏玉清, 等. 旱作条件下盐分冲洗试验对盐碱

- 土的改良洗盐效果[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 235-241.
- XIA T, YANG J G, WEI Y Q, et al. Effect of salt washing test on improving salt washing in saline-alkali soil under dry farming conditions[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2017, 45(8): 235-241 (in Chinese with English abstract).
- [22] 梁嘉平. 施用生物炭对南疆膜下滴灌土壤性质及棉花和甜菜生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. LIANG J P. Effects of biochar application on soil properties and cotton and beet growth under drip irrigation under plastic film in southern Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [23] 赵宇龙, 李明思, 陈绍民, 等. 滴灌条件下层状土壤滞盐作用的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 29-34. ZHAO Y L, LI M S, CHEN S M, et al. Retardation effect of layered soil to salt transfer under drip irrigation[J]. Journal of irrigation and drainage, 2015, 34(6): 29-34 (in Chinese with English abstract).
- [24] 冯进平, 刘洪光, 曹明海, 等. 定期冬灌对北疆不同土质棉田水盐分布及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 48-54. FENG J P, LIU H G, CAO M H, et al. Effects of regular winter irrigation on water and salt distribution and yield in cotton fields of different soil quality in northern Xinjiang[J]. Journal of Shihezi University (natural science), 2022, 40(1): 48-54 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张瀚, 杨鹏年, 汪昌树, 等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 42-46. ZHANG H, YANG P N, WANG C S, et al. Effect of winter irrigation amount on soil moisture and salt distribution in arid area[J]. Journal of irrigation and drainage, 2016, 35(11): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王晓彤, 胡振琪, 赖小君, 等. 黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 87-94. WANG X T, HU Z Q, LAI X J, et al. Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 86-93 (in Chinese with English abstract).
- [27] 龚嘉, 郑重谊, 刘勇军, 等. 粉垄深耕结合开沟排水对土壤养分和烤烟生长发育的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 75-81. GONG J, ZHENG C Y, LIU Y J, et al. Effects of deep ploughing with powder ridge and ditching drainage on soil nutrients and growth and development of flue-cured tobacco[J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition), 2022, 50(2): 75-81 (in Chinese with English abstract).
- [28] 尹志荣, 柯英, 桂林国, 等. 覆沙对盐碱地土壤水盐运移及枸杞生长和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1382-1393. YIN Z R, KE Y, GUI L G, et al. Effects of sand-covered on soil water and salt movement of saline-alkali land and *Lycium barbarum* growth and yield[J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis sinica, 2021, 30(9): 1382-1393 (in Chinese with English abstract).
- [29] 张宇航, 高佩玲, 张晴雯, 等. 中度盐碱土掺沙对土壤水盐运移和夏玉米生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 83-90. ZHANG Y H, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Effect of mixing sand with surface soil on moderately salinized soil water-salt transport and summer maize growth[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2019(2): 83-90 (in Chinese).
- [30] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 暗管排水条件下春灌定额对土壤水盐运移规律的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 318-328. DOU X, SHI H B, LI R P, et al. Effects of spring irrigation quotas on soil water and salt transport under condition of subsurface drainage[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(10): 318-328 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王振华, 衡通, 李文昊, 等. 滴灌条件下排水暗管间距对土壤盐分淋洗的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 253-261. WANG Z H, HENG T, LI W H, et al. Effects of drainage pipe spacing on soil salinity leaching under drip irrigation condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 48(8): 253-261 (in Chinese with English abstract).
- [32] 曹明海, 刘洪光, 王刚, 等. 不同粉垄深度和春灌灌水量对土壤水盐运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2022(2): 13-20. CAO M H, LIU H G, WANG G, et al. Effects of different powder ridge depth and spring irrigation amount on soil water and salt transport[J]. Water saving irrigation, 2022(2): 13-20 (in Chinese with English abstract).
- [33] 马君, 崔建平, 金亮, 等. 新疆滴灌棉田深松后土壤理化性质及产量的变化特征[J]. 中国农学通报, 2020, 36(32): 82-87. MA J, CUI J P, JIN L, et al. Variation characteristics of soil physical and chemical properties and yield after subsoiling in drip irrigated cotton fields in Xinjiang[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2020, 36(32): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [34] 姚荣江, 李红强, 杨劲松, 等. 滴灌下生物质改良材料对盐渍土水盐氮运移的调控效应[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 282-291. YAO R J, LI H Q, YANG J S, et al. Regulation effect of biomass improved materials on migration of soil water, salt and nitrogen in salt-affected soil under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(11): 282-291 (in Chinese with English abstract).
- [35] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 757-762. WANG X P, YANG J S, ZHANG S J, et al. Effects of different amendments application on cotton growth and soil properties in arid areas[J]. Ecology and environmental sciences, 2020, 29(4): 757-762 (in Chinese with English abstract).

Effects of different improvement measures on desalination of interlayer soil in heavy saline-alkali land

LIU Hongbo^{1,2}, BAI Yungang^{1,2}, LU Zhenlin^{1,2}, ZHENG Ming^{1,2}, DING Yu¹, XIAO Jun^{1,2}, HAN Zhengyu¹

1.Xinjiang Academy of Water Resources and Hydropower Sciences, Urumqi 830049, China;

2.Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization in Saline-Alkali Land in Arid and Semi-Arid Regions, Urumqi 830052, China

Abstract The large-scale interlayer soil in heavy saline-alkali land formed by concentrated and continuous sections after the water-saving construction with large-scale and high efficiency in the Weigan River irrigation area was used to solve the practical problems of large quantity of engineering and high cost of production in the existing improvement measures for heavy saline-alkali land. The changes of water and salt in soil under winter irrigation conditions with different improvement measures were studied through field plot experiment. The results showed that the deep-turning treatment had the highest desalination rate of 75.9% among all the treatments, followed by ditching, drilling and sand filling, and drilling and sand filling treatment, accounting for 51.5% and 39.4%, respectively. The desalination rate of ditching and drilling was relatively close, accounting for 38.2% and 37.4% respectively. The lowest desalination rate of ditching was 33.9%. The content of salt under each measure in the 0-20 cm soil layer after two and three times of winter irrigation decreased from 7.06-11.61 g/kg before winter irrigation in 2020 to 2.00-5.91 g/kg after winter irrigation in 2022, with a desalination rate ranged from 76.8% to 382.5%. It is indicated that the surface soil has been improved from the initial medium-heavy saline-alkali soil to light-medium saline-alkali soil, reflecting the retarding effect of clay interlayers on the transport of water and salt. Drilling and sand filling can be used as a simple and practical measure to improve the effect of salt leaching and suppress the return of salt in saline-alkali land. It will provide basic data and technical reference for the rational selection of improvement measures for interlayer soil in the heavy saline-alkali land.

Keywords soil salinization; heavy saline-alkali land; soil improvement; desalination; salt leaching; winter irrigation; interlayer soil

(责任编辑:张志钰)