

暗管排水砂滤料对稻田盐碱地水盐运移规律的影响

刘嘉斌¹, 田军仓^{1,2,3*}, 张 萌¹, 王金鹏¹, 杨振峰¹, 赵广兴¹

(1.宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021)

摘 要:【目的】通过研究不同砂滤料暗管排水对稻田盐碱地土壤水盐运移规律的影响, 探明暗管排水最佳砂滤料, 为稻田盐碱地治理提供理论依据。【方法】根据当地暗管排水现状及以往过滤经验, 采用对比试验设计, 研究细砂粒、细砂粒和细碎石混合(1:2)、细碎石 3 种不同砂滤料暗管排水条件下土壤水分、盐分运移规律。【结果】暗管砂滤料采用细砂粒和细碎石(1:2)混合处理在水稻灌水期可以有效降低 0~60 cm 土壤体积含水率, 提高土壤脱盐率; 在水稻停水晒田期可以有效缓解 0~60 cm 土壤水分流失, 抑制土壤返盐。【结论】暗管排水砂滤料选用细砂粒和细碎石(1:2)混合适宜稻田重度盐碱地治理。

关 键 词: 暗管排水; 砂滤料; 盐碱地; 土壤水分; 土壤盐分

中图分类号: S278

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20222226

OSID:



刘嘉斌, 田军仓, 张萌, 等. 暗管排水砂滤料对稻田盐碱地水盐运移规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 114-121.

LIU Jiabin, TIAN Juncang, ZHANG Meng, et al. Effect of Sand Filter in Subsurface Drain on Water and Salt Movement in Paddy Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 114-121.

0 引 言

【研究意义】由于自然和人为因素影响, 我国宁夏、新疆等地形成了大量盐碱地, 其不利于作物生长发育, 造成作物大面积减产, 甚至绝产, 严重制约我国农业可持续发展^[1]。灌水洗盐、化学改良等传统盐碱地改良措施会造成水资源浪费且改良效果差, 并且化学药剂容易造成二次污染, 而采用暗管排水排盐技术可以有效防治土壤盐碱化、改善土壤环境^[2-6], 同时结合盐碱地种植水稻可以明显改良土壤水环境, 加快洗盐速度^[7]。因此对于干旱少雨且盐碱化较重地区而言, 暗管排水结合稻田淹灌可以最大限度地降低土壤盐分, 提升水稻产量, 实现盐碱地改良和利用^[8-9]。【研究进展】国内外学者针对暗管排水的水盐运移规律进行了广泛研究。Qian 等^[10]通过田间试验和数值模拟的方法研究表明暗管埋深和间距对土壤脱盐率均有显著影响, 但管径对土壤脱盐率影响可以忽略不计; 张金龙等^[11]通过田间试验研究不同暗管间距对盐碱地土壤脱盐效果的影响, 表明暗管埋设间距越小, 暗管排水排盐效率

越高, 但施工成本会增加, 因此在暗管布置时要进行综合效益评价; 石佳等^[4]通过田间试验表明暗管排水可以有效降低土壤盐分, 提高油菜产量, 增加土壤水分利用效率; 陈名媛等^[12]通过田间试验表明土壤脱盐率在暗管垂直方向上随土层深度增加而降低; 杨玉辉等^[13]在膜下滴灌条件下探究不同暗管间距与埋深对土壤脱盐效果的影响, 结果表明暗管间距和埋深越小土壤脱盐率越高; Long 等^[14]利用模型箱进行管道模拟试验, 结果表明排水管道包裹无纺布或填充碎石均能减少管道堵塞程度; Liu 等^[15]针对暗管堵塞问题, 研究了分别包裹机织土工布和编织土工布的暗管排水特性, 结果表明包裹编织土工布暗管排水效率高, 不易堵塞。【切入点】目前对暗管排水排盐技术研究主要集中在暗管布置以及暗管外包料选择及脱盐率等方面, 但关于不同暗管砂滤料对重度盐碱地水盐运移规律研究甚少。【拟解决的关键问题】本试验利用作物措施结合暗管排水技术对重度盐碱地进行改良, 研究在不同砂滤料暗管排水条件下稻田土壤水盐运移规律特征, 以筛选出最佳暗管砂滤料, 为当地重度盐碱地治理和利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区银川市兴庆区月牙湖乡月牙湖村, 属典型温带大陆性气候, 昼夜温差

收稿日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869024); 宁夏自治区重点研发计划重大项目(2018BBF02022); 国家重点研发项目(2021YFD1900600); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 刘嘉斌(1996-), 男, 山西朔州人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 540917057@qq.com

通信作者: 田军仓(1958-), 男, 陕西宝鸡人。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究、水资源高效利用和水资源工程等方面研究。E-mail: slxtjc@163.com

大, 干旱少雨, 试验区位置见图 1。试验于 2021 年 5 月 1 日—9 月 30 日进行, 在试验期内日平均气温为 22.39 °C, 总降雨量为 84.07 mm, 降雨主要集中在 6—9 月。试验地为盐荒地, 经过铺砂改造。试验

区 0~60 cm 土壤平均初始盐分为 5.15 g/kg, 属于重度盐碱化土壤^[16], 试验区地下水埋深在 1.2~1.6 m 之间。试验区稻田盐碱地暗管排水前土壤理化性质见表 1。

表 1 试验区 0~60 cm 土层初始土壤理化性质

Table 1 Initial soil physicochemical in the test area at different depths from 0~60 cm

土层深度/cm	田间持水率/%	土壤体积饱和含水率/%	干体质量/(g·cm ⁻³)	全盐量/(g·kg ⁻¹)	pH 值	质地
0~20	20.70	49.00	1.48	3.77	8.52	砂壤土
20~40	21.80	55.80	1.51	4.89	8.61	砂壤土
40~60	23.06	59.30	1.53	6.78	8.67	砂壤土
平均	21.85	54.70	1.51	5.15	8.60	砂壤土

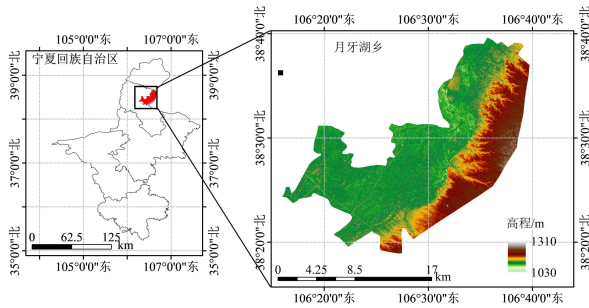


图 1 试验区位置

Fig.1 Location map of the test area

1.2 试验设计

本文根据宁夏当地暗管排水施工技术规范及以往暗管排水过滤经验, 选取粒径范围分别在 0.3~3.5 mm 细砂粒和 10~20 mm 细碎石 2 种初始砂滤料, 并且在灌水方式、灌水量、灌溉水含沙量、暗管有效滤水面积、水稻种植品种等相同条件下, 设计 3 种不同砂滤料暗管排水排盐装置。试验处理设计方案见表 2, 暗管排水砂滤料布置剖面见图 2。

表 2 试验处理设计

Table 2 Experimental treatment design table

处理	砂滤料	粒径范围
F1	细砂粒	0.3~3.5 mm
F2	细砂粒和细碎石混合 (1:2)	0.3~3.5、10~20 mm
F3	细碎石	10~20 mm

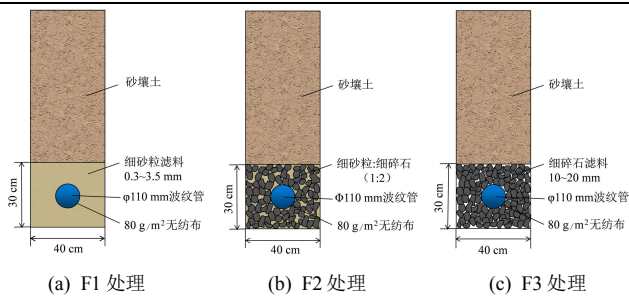


图 2 不同处理砂滤料布置剖面

Fig.2 Different treatment sand filter layout section

1.3 试验实施

暗管布置形式为东西布设, 首端埋深 1.0 m, 末端埋深 1.2 m, 暗管坡度为 1.6‰, 田间吸水管直径为 110 mm, 集水管直径为 200 mm。各处理地块长×宽=75 m×16 m, 且各处理试验区间设置 1.2 m 深的防渗带和 50 cm 高的田埂, 以防止土壤水分交换。

以水稻“秋优 88”为供试作物, 在 5 月 19 日进行水稻早播, 5 月 20 日开始黄河水淹灌, 9 月 4 日灌溉后停水晒田, 关闭暗管蝶阀, 10 月 1 日收割, 在其生育期内灌溉、施肥及其他田间管理措施均与当地农户一致。暗管排水田间布置见图 3。灌溉水源为黄河水, 其 TDS 为 265.5 mg/L, EC 为 0.532 mS/cm。

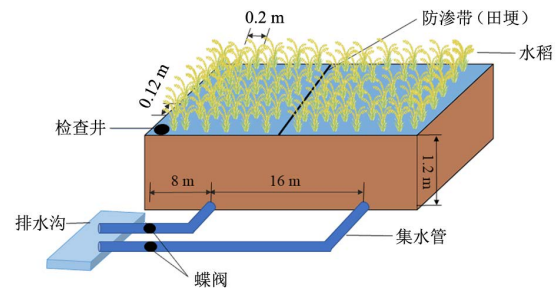


图 3 田间暗管布置

Fig.3 The arrangement of the dark pipe in the field

1.4 测定指标和方法

土壤体积含水率测定: 采用 TDR 仪测量土壤体积含水率, 每个处理试验区取 3 个测点, 分别测定不同深度的土壤体积含水率 (0~20、20~40、40~60 cm)。

暗管滤水流量测定: 各处理区暗管上安装流量表, 在每次稻田灌水后定时记录流量表读数, 并且采用容积法校准滤水流量, 每次测定 3 次取平均值。

土壤全盐量测定: 各处理区标记 3 处位置, 采用土钻取不同深度 (0~20、20~40、40~60 cm) 土样, 将土样自然风干后, 利用电导率仪 DDS-307A 测定土水质量比为 1:5 土壤浸提液电导率, 然后换算土壤全盐量^[17]。土壤全盐量换算方程为:

$$y = (EC + 41.2653) / 2120.76 \times 5, \quad (1)$$

式中: y 为土壤全盐量 (g/kg); EC 为电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)。

土壤脱盐率计算式:

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

式中: N 为脱盐率 (%); S_1 为土壤盐分初始值 (g/kg); S_2 为灌后土壤盐分终值 (g/kg)。

1.5 数据处理

所有数据采用 SPSS 26 进行分析, 采用 Origin

2021、ArcGIS 10.7、Excel 2010 进行绘图。统计特征值可以精确描述数据分布情况,是具有代表性的数据特征值,其中变异系数 C_v 可以客观反映数据变化程度,规定 $C_v < 10\%$ 为弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性, $C_v > 100\%$ 为强变异性^[18]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分时空运移规律

表 3 为暗管排水条件下水稻生育期内各处理

0~60 cm 不同深度土壤体积含水率统计特征值。由表 3 可知,除 F1 处理 40~60 cm 土层的土壤水分属于弱变异性以外,F1 处理 0~20、20~40 cm 土层和 F2、F3 处理各土层土壤水分均属于中等变异性,且随土层深度的增加变异系数有减小的趋势。F1、F2、F3 处理在水稻全生育期内 0~60 cm 平均土壤体积含水率分别为 37.50%、50.25%、43.89%,可见 F2 处理较 F1 处理和 F3 处理平均土壤体积含水率分别提高 34.0%和 14.49%。

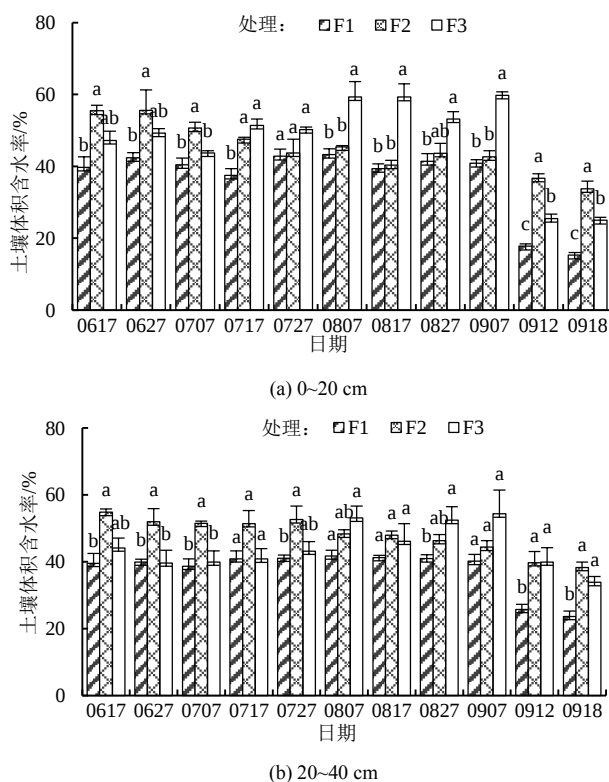
表 3 水稻生育期内不同处理不同土层土壤体积含水率统计特征值

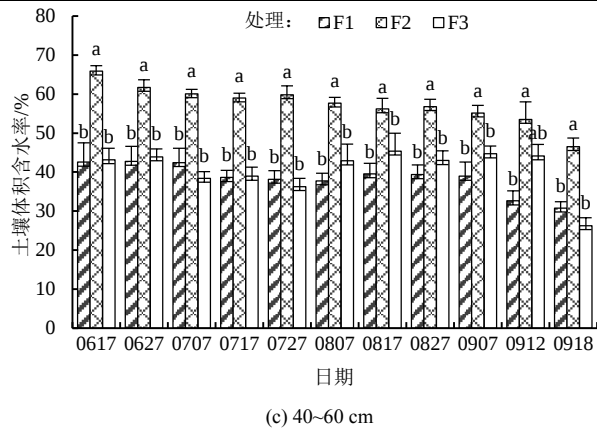
Table 3 Statistical characteristic values of soil volumetric water content of different soil layers in different treatments during the rice reproductive period

处理	土层深度/cm	土壤体积含水率/%			标准偏差	变异系数/%	偏度系数	峰度系数
		最大值	最小值	平均值				
F1	0~20	43.27	15.26	36.42	10.0	27.46	-1.817	1.859
	20~40	41.77	23.66	37.59	6.45	17.17	-1.865	2.013
	40~60	42.75	30.76	38.49	3.83	9.96	-0.998	0.592
	0~60 cm 平均值	43.27	15.26	37.50	7.04	18.78	-2.106	3.77
F2	0~20	55.58	33.78	45.04	6.96	15.47	0.127	-0.543
	20~40	54.84	38.28	48.21	5.23	10.84	-0.94	0.166
	40~60	65.90	46.5	57.49	5.98	10.39	-0.692	1.897
	0~60 cm 平均值	65.90	33.78	50.25	7.76	15.44	-0.276	-0.035
F3	0~20	59.74	24.97	47.62	12.22	25.66	-1.16	0.47
	20~40	54.36	33.84	44.32	6.56	14.81	0.328	-0.823
	40~60	45.38	26.28	39.73	5.94	14.95	-1.301	1.318
	0~60 cm 平均值	59.74	24.97	43.89	9.05	20.63	-0.276	-0.035

由图 4 可知,在水稻灌水期内(6月17日—9月7日),F1 处理在 0~20、20~40、40~60 cm 的土壤体积含水率随时间变化呈相对平稳的趋势;F2 处理在 0~20、20~40、40~60 cm 的土壤体积含水率随时间呈下降趋势,在灌水期结束时各土层体积含水率分别下降 23.03%、19.05%、16.31%;F3 处理在 0~20、20~40、40~60 cm 的土壤体积含水率随时间呈上升趋势,灌水期结束时各土层体积含水率分别提高 26.59%、23.15%、3.57%。在水稻停水晒田后(9月7—18日),暗管排水蝶阀关闭,由于土壤蒸发,各处理不同土层的土壤水分均有下降趋势,同时由于 F2 处理灌溉期入渗量大,停水后地下水有顶托现象,(9月18日)在 0~20 cm 土层中 F2 处理土壤体积含水率显著高于 F1 处理和 F3 处理,且 F3 处理显著高于 F1 处理,F2 处理土壤体积含水率分别比 F1 和 F3 处理高 121.36%、35.28%,F3 处理比 F1 处理高 63.63%;20~40 cm 土层中 F2 处理和 F3 处理土壤体积含水率显著高于 F1 处理,F2 处理和 F3 处理之间差异不显著,F2 处理和 F3 处理分别比 F1 处理高 61.79%和 43.03%;40~60 cm 土层中 F2 处理土壤体积含水率显著高于 F1 处理和 F3 处理,F2 处理土壤体

积含水率分别比 F1 处理和 F3 处理高 51.17%和 76.94%。





注 图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$), 下同。
图 4 水稻生育期内不同处理不同土层土壤水分随时间变化
Fig.4 Soil moisture in different soil layers under different treatments varied with time during rice growth period

图 5 为水稻生育期内不同处理土壤水分时空分布。由图 5 可知, 在水稻灌水期间, F1 处理 0~60 cm 土壤水分均匀分布, 且土壤体积含水率随时间变

化相对平缓; F2 处理土壤水分在 40~60 cm 土层中呈聚集型, 其灌水期内平均土壤体积含水率比 0~20、20~40 cm 土层分别提高 25.26%、18.49%, 40~60 cm 深层土壤保持较高的土壤水分可为应对干旱条件提供水源; F3 处理 0~60 cm 土壤水分随时间呈聚集型, 作物根系层土壤水分过高可能会导致土壤通气不畅, 最终影响水稻生长发育。在水稻停水晒田后, 各处理表层土壤受蒸发影响较大, 土壤体积含水率下降速度较快, 且随土层深度增加而有减小的趋势。由图亦可得知, F2 处理土壤水分流失速度最为缓慢, 在水稻晒田结束时 (9 月 18 日), 0~20、20~40、40~60 cm 处土壤体积含水率较灌水期结束时 (9 月 7 日) 而言, 分别减少了 20.83%、13.76%、15.68%。综上, F2 处理由于砂滤料级配优于 F1 处理和 F3 处理, 在水稻灌水期内可以有效降低 0~60 cm 土壤体积含水率, 在水稻停水晒田后可有效提升 0~60 cm 土壤保水能力。

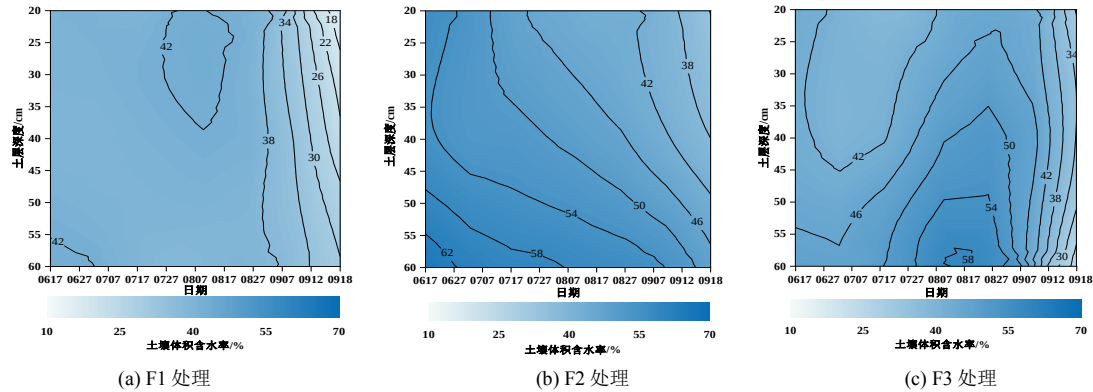


图 5 水稻生育期内不同处理土壤水分时空分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of soil moisture in different treatments during the rice reproductive period

2.2 暗管排水滤水流量规律

滤水流量是反应砂滤料暗管排水过滤性能的重要指标之一。由表 4 可知, F1、F2、F3 处理滤水流量变化均属于中等变异性, 且 F2 处理变异系数明显小于 F1、F3 处理, 表明 F2 处理暗管排水过滤层对

于 F1 处理和 F3 处理而言较为稳定。在暗管排水期间内, F2 处理平均滤水流量最大, 为 0.38 m³/h, F3 处理次之, F1 处理最小, F2 处理滤水流量比 F1 处理和 F3 处理提高了 123.53%和 100.0%。

表 4 水稻生育期内不同处理滤水流量统计特征值

Table 4 Statistical characteristic values of filtered water flow in different treatments during the rice reproductive period

处理	滤水流量/(m ³ ·h ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%	偏度系数	峰度系数
	最大值	最小值	平均值				
F1	0.45	0.07	0.17	0.11	63.45	1.35	0.96
F2	0.56	0.32	0.38	0.06	16.19	1.68	2.78
F3	0.58	0.09	0.19	0.11	57.96	2.59	7.63

由图 6 可知, 不同砂滤料的暗管排水装置在试验期内滤水流量变化趋势保持一致, 均在试验初期滤水流量快速下降, 随后下降速率减缓, 最终滤水流量趋于稳定, 分析原因主要为土壤水分逐渐达到饱和状态, 入渗速度减慢, 并且砂滤料孔隙逐渐被土壤颗粒和杂质填充, 最终导致过滤层滤水能力减弱。但各处理装置滤水流量在试验期前后存在明显差异,

其变化范围可大致反应砂滤料在试验末期堵塞程度, F1、F2、F3 处理装置滤水流量试验期初、末差分别为 0.35、0.18、0.42 m³/h, 表明各处理在试验期内砂滤料堵塞程度分别为 77.78%、32.14%、72.41%, 说明暗管排水砂滤料选用细砂粒和细碎石 (1:2) 混合可以有效减缓砂滤料堵塞程度, 提高滤水能力。

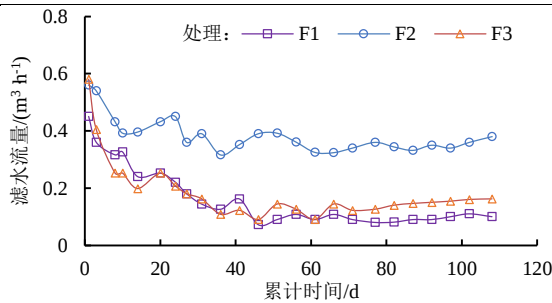


图6 水稻生育期内不同处理滤水流量变化趋势

Fig.6 Trend of filtered water flow in different treatments during the rice reproductive period

表5 水稻生育期内不同处理不同土层土壤全盐量统计特征值

Table 5 Statistical characteristics of total soil salinity in different soil layers in different treatments during the rice reproductive period

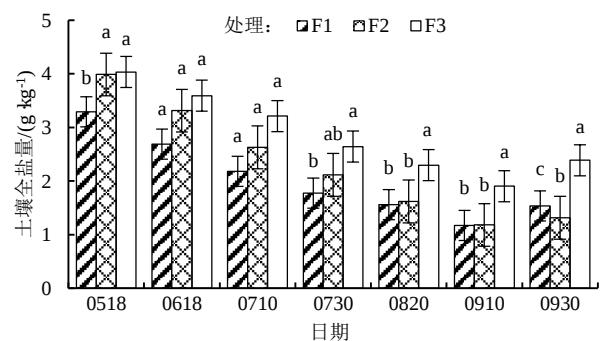
处理	土层深度/cm	土壤全盐量/(g kg ⁻¹)			标准偏差	变异系数/%	偏度系数	峰度系数
		最大值	最小值	平均值				
F1	0~20	3.43	1.04	2.03	0.733	36.11	0.682	-0.718
	20~40	4.35	2.13	3.07	0.612	19.98	0.323	-0.835
	40~60	5.82	3.65	4.73	0.675	14.27	0.009	-1.079
	0~60 cm 平均值	5.82	1.04	3.44	1.28	37.14	-0.117	-0.756
F2	0~20	4.19	0.99	2.31	1.051	45.55	0.559	-1.125
	20~40	5.43	1.82	3.21	1.101	34.27	0.422	-1.038
	40~60	7.07	3.37	4.77	1.152	24.15	0.564	-0.854
	0~60 cm 平均值	7.07	0.99	3.59	1.63	45.33	0.262	-0.968
F3	0~20	4.16	1.79	2.87	0.790	27.56	0.503	-1.221
	20~40	6.24	2.87	4.28	1.122	26.22	0.418	-1.466
	40~60	8.98	5.19	6.61	1.108	16.76	0.757	-0.630
	0~60 cm 平均值	8.98	1.79	4.27	1.93	45.22	0.692	-0.578

由图7可知,3个处理在0~60 cm不同土层的土壤盐分随时间变化规律保持一致,在水稻灌水期内土壤盐分呈下降趋势,停水后有一定幅度上升。3个处理在持续灌水的条件下土壤盐分呈现差异性,在灌水期结束时(9月10日),在0~20 cm土层中,F3处理土壤盐分显著高于F1处理和F2处理,且F1、F2、F3处理脱盐率分别为64.46%、71.28%、53.08%;在20~40 cm土层中F2处理土壤盐分显著低于F1处理和F3处理,F1、F2、F3处理脱盐率分别为41.28%、60.10%、50.53%;在40~60 cm土层中,F3处理土壤盐分显著高于F1处理和F2处理,F1处理和F2处理之间未产生显著性差异,F1、F2、F3处理脱盐率分别为33.24%、47.71%、32.84%。在灌水期结束后,受蒸发和地下水位影响,土壤出现返盐。在水稻收获时(9月30日),3个处理在不同土层的土壤全盐量均存在显著性差异,F3处理土壤盐分最高,F1处理次之,F2处理最低。在0~20 cm土层中,F1、F2、F3处理土壤盐分相比于灌水期结束时,返盐率分别为34.12%、17.05%、24.95%;在20~40 cm土层中,F1、F2、F3处理返盐率分别为22.31%、6.25%、13.88%;在40~60 cm土层中,

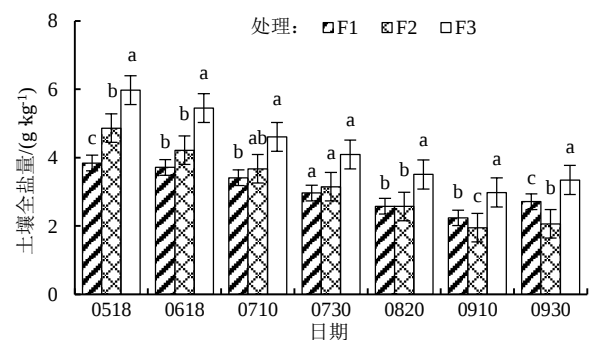
2.3 土壤盐分时空运移规律

表5为暗管排水条件下水稻生育期内各处理0~60 cm不同深度土壤盐分统计特征值,由表5可知,3组处理土壤盐分变化在水稻生育期内均属于中等变异性,且各处理变异系数随着土层深度增加而减少,F2处理下不同土层的变异系数均大于F1处理和F3处理。其中在0~60 cm土层中,F3处理平均土壤盐分最大,F2处理次之,F1处理最小,F3处理较F1处理和F2处理土壤全盐量分别高24.13%和18.94%。

F1、F2、F3处理返盐率分别为19.51%、2.33%、7.47%。综上表明,F2处理在水稻灌水期内可以有效降低0~60 cm土壤盐分,在水稻停水晒田后可有效抑制0~60 cm土壤返盐。



(a) 0~20 cm



(b) 20~40 cm

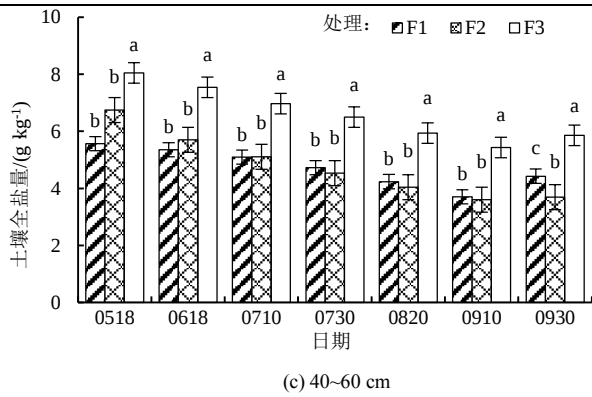


图7 水稻生育期内不同处理不同土层土壤全盐量随时间变化
Fig.7 Variation of total soil salinity with time in different soil layers of different treatments during the rice reproductive period

图8 为水稻生育期内不同处理土壤盐分时空分布。由图8可知,各处理土壤盐分均随土层深度增

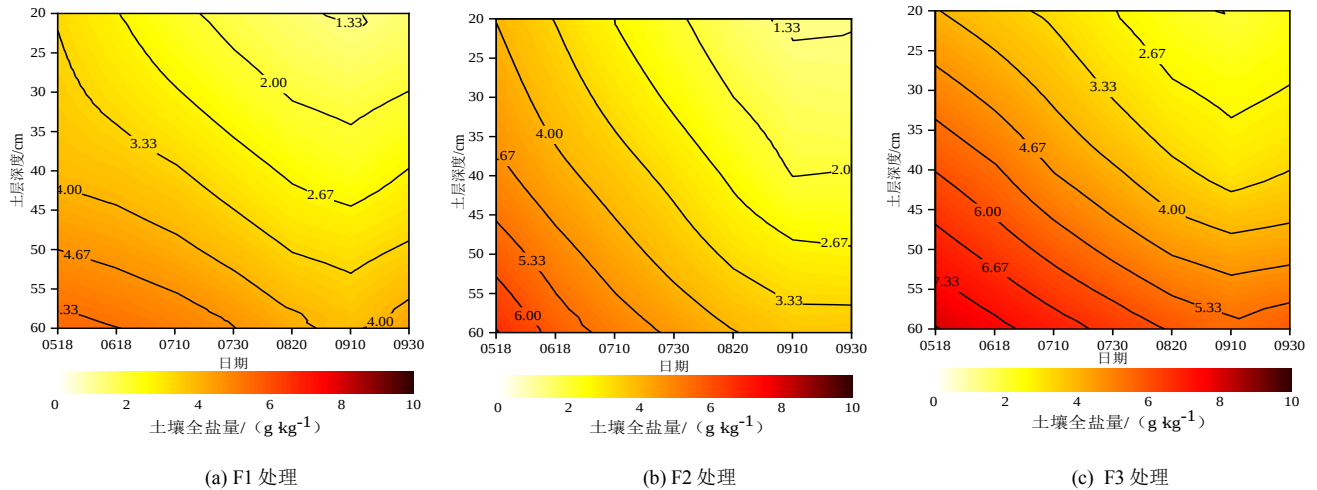


图8 水稻生育期内不同处理土壤盐分时空分布

Fig.8 Spatial and temporal distribution of soil salinity in different treatments during the rice reproductive period

3 讨论

暗管排水砂滤料孔隙与土壤水盐运移规律密切相关,陶园等^[19]研究表明过滤层良好的颗粒级配是影响过滤性能的重要因素之一。研究表明,F1、F2、F3处理试验期内平均滤水流量分别为0.17、0.38、0.19 m³/h,F2处理滤水流量分别是F1处理和F3处理的2.24倍和2.0倍。主要原因是F2处理暗管排水砂滤料选用细砂粒和细碎石(1:2)混合时,砂滤料级配较好,孔隙适中,会形成稳定的过滤层,这与胡玲玲等^[20]研究结果保持一致,在稳定过滤层作用下可以有效增加暗管排水排盐量。

本研究表明,在3种不同砂滤料暗管排水条件下,各处理土壤水分时空分布存在明显的差异性。其中在水稻灌水期间F1处理0~60 cm土壤水分均匀分布,主要因为细砂粒孔隙在试验初期迅速被土壤细小颗粒堵塞,因此暗管排水流速稳定,土壤连通性较好^[21]。F2处理暗管排水砂滤料选用细砂粒和

细碎石混合(1:2)时,0~20、20~40、40~60 cm土壤体积含水率随时间变化呈下降趋势,这与温越等^[22]在暗管排水条件下滴灌油菜时水分运移规律基本一致,并且研究发现土壤水分存在分层现象,40~60 cm处土壤水分明显高于0~40 cm,主要原因可能是F2处理在高效排水排盐作用下改变了40~60 cm深层土壤的颗粒级配,土壤孔隙度增加,进而提高了土壤体积饱和含水率,这与于丹丹等^[9]对盐碱地不同灌水定额试验所得结论相似。F3处理在水稻灌水期内0~20、20~40、40~60 cm土壤体积含水率持续升高,这是因为细碎石较大的孔隙逐渐被流失的土壤杂质填充,暗管滤水能力减弱,导致土壤水分升高,严重时可能会影响水稻根系通气情况,抑制水稻生长。在水稻停水晒田后,暗管排水蝶阀关闭,由于土壤蒸发,各处理不同土层的土壤水分均有下降趋势,同时由于F2处理灌溉期入渗量大,致使土壤孔隙增大,土壤气体被水包围,形成气泡阻碍土壤水分下渗,从而提高土壤保水率。

研究表明在不同砂滤料的暗管排水条件下, 水稻灌水期内各处理土壤全盐量均有效降低, 随土层深度增加脱盐率减小; 而在水稻停水晒田后, 各处理均出现返盐现象, 随土层深度增加返盐率减小, 这与窦旭等^[23]在暗管排水条件下不同春灌定额水盐运移规律研究结果保持一致。在水稻灌水期内, F2 处理在不同土层脱盐率均高于 F1 处理和 F3 处理, 主要因为 F2 处理在 0~60 cm 土层水分下渗速度快, 且暗管排水排盐量高, 可以有效淋洗土壤盐分。在水稻停水晒田后, F2 处理在不同土层返盐率低于 F1 处理和 F3 处理, 其原因可能是该处理砂滤料级配较好, 土壤水分的分层阻碍了土壤毛管水的流通, 破坏了土体的连通性, 从而抑制了土壤盐分向上聚集, 这与王曼华等^[24]研究结果相似。

4 结论

1) 在重度稻田盐碱地暗管排水工程条件下, 细砂粒和细碎石混合 (1:2) 的 F2 处理暗管排水装置滤水流量明显优于细砂粒 F1 处理和细碎石 F3 处理。

2) 在水稻灌水期间, F2 处理由于砂滤料级配良好, 可以有效降低 0~60 cm 土壤体积含水率, 避免水稻根系层因土壤含水率过高导致通气不畅等问题, 在水稻停水晒田后, F2 处理有效提高了 0~60 cm 土层的保水能力。

3) 在水稻全生育期内, F2 处理的脱盐率以及抑盐效果明显优于 F1 处理和 F3 处理。

参考文献:

- [1] 张亦冰, 高宗昌. 盐碱地治理中排水暗管间距和外包滤料应用分析[J]. 中国水土保持, 2018(9): 27-29, 66.
ZHANG Yibing, GAO Zongchang. The space of subsurface draining pipe and application of outsourced filter during the saline-alkali soil management[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(9): 27-29, 66.
- [2] 陈建华, 王海江, 宋江辉, 等. 不同改良措施对新疆盐渍化棉田的改良效果[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(12): 2 228-2 237.
CHEN Jianhua, WANG Haijiang, SONG Jianghui, et al. Study on the effects of different improvement measures on salinized cotton field in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(12): 2 228-2 237.
- [3] 张小栋, 刘绍雄, 孙宇, 等. 滨海盐碱地不同改良年限土壤理化性质的变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 113-118.
ZHANG Xiaodong, LIU Shaoxiong, SUN Yu, et al. Variation characteristics of soil physicochemical properties of coastal saline-alkali lands with different improvement years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 113-118.
- [4] 石佳, 田军仓, 朱磊. 暗管排水对油菜地土壤脱盐及水分生产效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(11): 46-50.
SHI Jia, TIAN Juncang, ZHU Lei. Effects of subsurface pipe drain on soil desalination and water use efficiency of oil sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(11): 46-50.
- [5] 黄愉, 田军仓. 太阳能暗管排水对银北灌区油菜土壤环境及产量影响[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 20-25.

- HUANG Yu, TIAN Juncang. The effects of solar subsurface pipe drain on soil environment and yield of oil sunflower in Yinbei irrigation area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 20-25.
- [6] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1-17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao irrigation district: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 1-17.
- [7] 程知言, 胡建, 葛云, 等. 种植耐盐水稻盐碱地改良过程中的盐度变化趋势研究[J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2 592-2 600.
CHENG Zhiyan, HU Jian, GE Yun, et al. Study on the changing trend of salinity in the process of planting salt-tolerant rice to improve saline-alkali soil[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(12): 2 592-2 600.
- [8] 赵春燕, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区暗管排水稻田盐分空间变异及排盐效果[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 229-237.
ZHAO Chunyan, LI Xianye, SHI Haibin, et al. Spatial variability and discharge effect of salt in rice field with subsurface pipe drainage in Hetao Irrigated Area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4): 229-237.
- [9] 于丹丹, 史海滨, 李祯, 等. 暗管排水与节水灌溉条件下盐渍化农田水盐分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 252-260.
YU Dandan, SHI Haibin, LI Zhen, et al. Distribution characteristics of water and salt under closed saline drainage pipe and water-saving irrigation in saline soils[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(4): 252-260.
- [10] QIAN Y Z, ZHU Y, YE M, et al. Experiment and numerical simulation for designing layout parameters of subsurface drainage pipes in arid agricultural areas[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106 455.
- [11] 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 Jinlong, ZHANG Qing, WANG Zhenyu, 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.
- [12] 陈名媛, 黄介生, 曾文治, 等. 外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 130-139.
CHEN Mingyuan, HUANG Jiesheng, ZENG Wenzhi, et al. Characteristics of water and salt transport in subsurface pipes with geotextiles under salt discharge conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 130-139.
- [13] 杨玉辉, 周新国, 李东伟, 等. 暗管排水对南疆高水位膜下滴灌棉田盐分淋洗效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 137-144.
YANG Yuhui, ZHOU Xinguo, LI Dongwei, et al. The efficacy of subsurface drain in desalinizing cotton field with shallow groundwater and mulched drip-irrigation in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 137-144.
- [14] YONG W L, TAIB S N L, SELAMAN O S. Evaluation of critical parameters to improve slope drainage system[J]. Advances in Civil Engineering, 2017, 2017: 379 642 3.
- [15] LIU S, WANG Y, FENG D. Model tests on drainage of pipes wrapped with woven and nonwoven geotextiles[J]. Geosynthetics International, 2020, 27(5): 551-560.
- [16] 靳韦, 王昊, 陈永伟, 等. 不同垄作根域限制栽培方式对滴灌土壤水盐运移的影响[J]. 北方园艺, 2021(9): 93-103.
JIN Wei, WANG Hao, CHEN Yongwei, et al. Movement of soil water and salt of drip irrigation under different ridge cultivation methods with root domain restrictions[J]. Northern Horticulture, 2021(9): 93-103.
- [17] 黄愉. 太阳能暗管排水对盐碱地改良及油菜、玉米灌溉制度的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
HUANG Yu. Effects of the solar energy underground drainage on

- improvement of saline-alkali land and irrigation system of oil sunflower and maize[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
- [18] 史海滨, 吴迪, 闫建文, 等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 318-331.
- SHI Haibin, WU Di, YAN Jianwen, et al. Spatial-temporal variation of soil salinity after water saving transformation in salinized irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 318-331.
- [19] 陶园, 王少丽, 许迪, 等. 改进暗管排水技术淤堵防护措施试验研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 187-192.
- TAO Yuan, WANG Shaoli, XU Di, et al. Experimental study of clogging defense measures for improved subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 187-192.
- [20] 胡玲玲, 杨树青, 梁志航, 等. 河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 141-148.
- HU Lingling, YANG Shuqing, LIANG Zhihang, et al. An experimental study on wrapping materials of subsurface drain for farmland in the downstream Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 141-148.
- [21] 甘磊, 张俊, 郑思文, 等. 秸秆覆盖对广西甘蔗地土壤水分与结构变化的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(7): 1 745-1 752.
- GAN Lei, ZHANG Jun, ZHENG Siwen, et al. Effects of straw mulching on the change of soil moisture and structure in sugarcane field in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(7): 1 745-1 752.
- [22] 温越, 王振华, 陈林, 等. 暗管埋深对滴灌油葵农田水盐运移及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 183-189.
- WEN Yue, WANG Zhenhua, CHEN Lin, et al. Effects of buried depth of subsurface pipe on water and salt transport and oil sunflower yield under drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2021, 39(2): 183-189.
- [23] 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 Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effects of spring irrigation quotas on soil water and salt transport under condition of subsurface drainage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 318-328.
- [24] 王曼华, 陈为峰, 宋希亮, 等. 秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1 395-1 403.
- WANG Manhua, CHEN Weifeng, SONG Xiliang, et al. Preliminary study on effect of straw mulching and incorporation on water and salt movement in salinized soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1 395-1 403.

Effect of Sand Filter in Subsurface Drain on Water and Salt Movement in Paddy Soil

LIU Jiabin¹, TIAN Juncang^{1,2,3*}, ZHANG Meng¹, WANG Jinpeng¹, YANG Zhenfeng¹, ZHAO Guangxing¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Technology Research Center of Water-saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Background and objective】 Saline-alkali soils are widely distributed in Ningxia. Because of the scarcity of precipitation, such soils are often reclaimed by flooding rice field combined with subsurface drain. This paper presents the results of an experimental study of water and salt movement in a paddy field as affected by the sand filter in the subsurface drain. 【Method】 The field experiment was designed based on our current understanding and previous experimental results of the subsurface drains in different regions across the province. The experiment compared three filters: fine sand, mixture of fine sand and fine gravel sand at 1 : 2 ratio and fine gravel. In each treatment, we measured spatiotemporal dynamics of soil water and soil salt. 【Result】 The filter with mixture of fine sand and fine gravel at 1 : 2 ratio effectively reduced water content in the top 0~60 cm soil, increasing soil desalination during irrigation period as a result. Decrease in water content in the top 0~60 cm soil reduced evaporation, thereby alleviating salt accumulation in the root zone and relieving salt stress to the crop. 【Conclusion】 The most effective filter for the subsurface drain in the studied paddy field is a mixture of fine sand and fine gravel at 1 : 2 ratio.

Key words: concealed pipe drainage; filter media; saline soil; soil moisture; soil salinity

责任编辑: 赵宇龙