

刘嘉斌, 田军仓, 杨振峰, 等. 不同砂滤料暗管排水对水稻生长及土壤盐分的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 65-72.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.008

## 不同砂滤料暗管排水对水稻生长及土壤盐分的影响

刘嘉斌<sup>1</sup>, 田军仓<sup>1,2,3</sup>, 杨振峰<sup>1</sup>, 李丹丹<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 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, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为探究盐碱地不同砂滤料暗管排水对水稻生长和土壤盐分的影响, 以水稻秋优 88 为试验材料, 设细砂粒(F1)、细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合(F2)、细碎石(F3)3 种暗管砂滤料, 分析不同暗管砂滤料处理对水稻生长、产量、水分利用效率、肥料偏生产力及土壤电导率的影响。结果表明, F2 处理有利于 0~60.0 cm 土壤排盐, 改善水稻根系环境, 对水稻生长及产量促进效果最为明显。F2 处理下, 水稻拔节期叶片 SPAD 值较 F1、F3 处理分别提高 10.24%、8.67%, 抽穗期叶片净光合速率、蒸腾速率均高于 F1、F3 处理, 稻谷产量较 F1、F3 处理分别提高 21.82%、15.29%; 在试验末期, F2 处理 0~60.0 cm 各土层电导率均显著低于 F1、F3 处理, 其中 F2 处理 0~20.0、20.1~40.0、40.1~60.0 cm 的土壤脱盐率分别为 68.72%、58.82%、45.96%, 脱盐率显著高于 F1、F3 处理。所以, 在土壤重度盐碱化地区, 选用细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合作为暗管排水砂滤料有利于降低土壤盐分, 提高水稻产量。

**关键词:** 盐碱地; 暗管排水; 砂滤料; 水稻

**中图分类号:** S156.4<sup>+</sup>6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2023)01-0065-08

## Effects of subsurface drainage with different sand filters on rice growth and soil salinity

LIU Jia-bin<sup>1</sup>, TIAN Jun-cang<sup>1,2,3</sup>, YANG Zhen-feng<sup>1</sup>, LI Dan-dan<sup>1</sup>

(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:** In order to explore the effects of subsurface drainage with different sand filter materials on rice growth and soil salinity in saline-alkali soil, Qiyou 88 was used as the experimental material, and three kinds of subsurface drainage sand filter materials were designed, including fine sand (F1), fine sand and fine gravel 1:2 mixture (F2) and fine gravel (F3). The effects of different subsurface drainage sand filter materials on rice growth, yield, water use efficiency, fertilizer partial productivity and soil conductivity were analyzed. The results showed that the stable filter layer of F2 treatment was beneficial to 0~60.0 cm soil desalinization, improved rice root environment, and promoted rice growth and yield. Under F2 treatment, the SPAD value of rice leaves at jointing stage was 10.24% and 8.67% higher than that of F1 and F3 treatments, respectively. The net photosynthesis rate and transpiration rate of leaves at heading stage were higher than those of F1 and

F3 treatments, and rice yield was 21.82% and 15.29% higher than that of F1 and F3 treatments, respectively. At the end of the experiment, the electrical conductivity of 0~60.0 cm soil layers in F2 treatment was significantly lower than that in F1 and F3 treatments, the soil desalination rates of 0~20.0 cm, 20.1~40.0 cm and 40.1~60.0 cm in F2 treatment were 68.72%, 58.82% and 45.96%, respectively, which were significantly higher than those in F1

收稿日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869024); 宁夏重点研发计划重大项目(2018BBF02022); 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

通讯作者: 田军仓, (E-mail) slxtjc@163.com

and F3 treatments. Therefore, in areas with severe soil salinization, the use of 1 : 2 mixture of fine sand and fine gravel as subsurface drainage sand filter is conducive to reducing soil salinity and improving rice yield.

**Key words:** saline-alkali land; pipe drainage; sand filter material; rice

中国盐碱地总面积约为 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 主要分布在西北、东北、华北及沿海等地区<sup>[1-2]</sup>, 且其面积还在不断扩大, 严重威胁我国耕地红线。土壤盐碱化通常会对植物造成复合盐碱胁迫<sup>[3]</sup>, 其影响大于单一的盐胁迫或碱胁迫, 严重限制作物生长发育和产量, 因此盐碱地已经成为制约中国农业发展的重要因素之一。盐碱地治理是当今世界共同面临的难题。前人对盐碱地治理做了诸多研究, 主要集中于深耕、换土、灌水、种植耐盐作物以及水利工程措施等<sup>[4]</sup>。研究发现, 重度盐碱地淹灌种植水稻虽可以淋洗土壤盐分<sup>[5]</sup>, 但土壤脱盐效果不佳, 且超量灌溉还会造成稻田排水不畅, 水稻根系环境恶化, 作物持续减产<sup>[6]</sup>等危害, 因此对重度盐碱地而言, 需稻田淹灌结合其他治理措施。而暗管排水作为一种有效的水利治理措施, 其原理是在作物根层以下铺设管道, 加快土壤排水排盐, 从而调控地下水位, 改善作物根系环境, 提高作物产量<sup>[7-10]</sup>。因此, 将暗管排水与稻田淹灌结合有望成为盐碱地治理的有效手段。

近年来, 国内外学者针对暗管排水排盐技术进行了大量研究。研究结果表明暗管间距<sup>[11-13]</sup>、埋深<sup>[14-15]</sup>对土壤脱盐效果均有显著性影响, 并且采用双层暗管排水系统可以有效减少  $\text{CO}_2$  排放量<sup>[16]</sup>。同时, 暗管外包材料类型<sup>[17]</sup> 和厚度<sup>[18]</sup> 对土壤水盐

运移也有一定的影响。目前, 暗管排水排盐技术研究主要集中于暗管埋深、间距、层级布置、外包材料等方面, 而关于暗管砂滤料的研究较少。本文针对宁夏引黄灌区重度砂质盐碱地暗管排水砂滤料对作物生长和土壤改良影响尚不明确现状, 以水稻为试验作物, 通过设置细砂粒、细碎石及细砂粒细碎石混合三种类型的砂滤料, 分析暗管排水砂滤料类型对水稻生长和土壤盐分的影响, 旨在寻求重度盐碱化稻田暗管排水的适宜砂滤料类型, 为重度盐碱地暗管排水方案的进一步优化提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2021 年 5–9 月在宁夏回族自治区银川市兴庆区月牙湖乡月牙湖村进行 ( $106^\circ 17' \text{E}$ ,  $38^\circ 28' \text{N}$ , 海拔 1 107.2 m)。试验区常年平均降雨量约 175 mm, 平均蒸发量达 1 500 mm, 地下水埋深约 1.26 m。试验田土壤类型为沙壤土, 0~60 cm 土壤容重  $1.51 \text{ g/cm}^3$ , 田间最大持水量 21.85%, 土壤 pH 8.6, 土壤全盐量  $5.2 \text{ g/kg}$ , 属于重度盐碱地<sup>[19]</sup>。土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为  $76.8 \text{ mg/kg}$ 、 $17.5 \text{ mg/kg}$  和  $355.3 \text{ mg/kg}$ 。试验区内有自动气象站, 2021 年 5–9 月水稻生长季逐日降雨量及日平均气温见图 1。

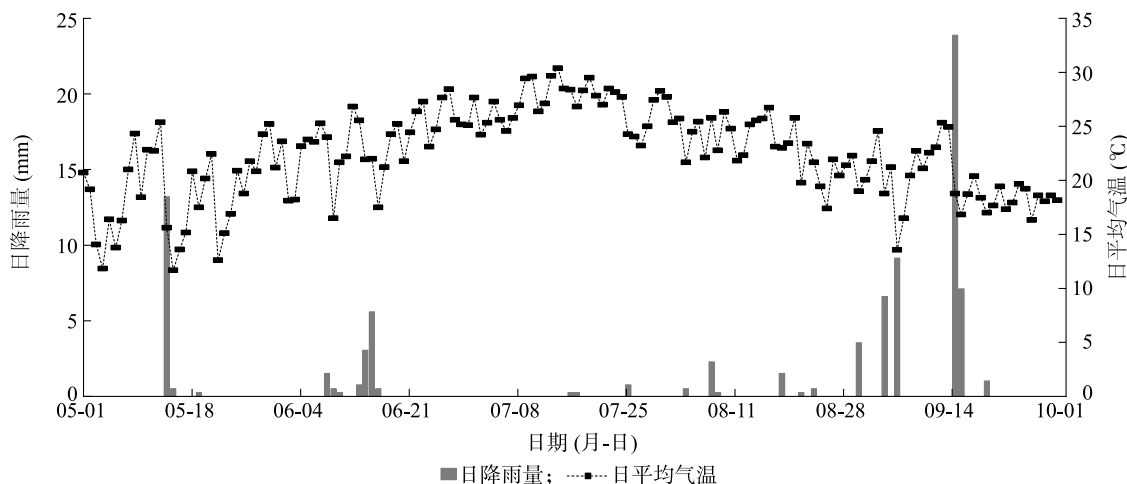


图 1 2021 年试验区 5–9 月的日降雨量及日平均气温

Fig.1 Daily rainfall and daily average temperature at the experimental site from May to September in 2021

1.2 试验设计

根据宁夏引黄灌区盐碱地暗管排水布置经验及以往过滤经验,试验设细砂粒、细碎石、细砂粒和细碎石1:2(质量比)混合3个暗管排水砂滤料处理(表1)。各处理面积为125 m×16 m,处理间设置1.2 m深的防渗带和50 cm高的田埂,以保证各处理间不串灌不串排。暗管布置形式为东西朝向布设,首端埋深1.0 m,末端埋深1.2 m,暗管坡度为0.16%,吸水管为直径110 mm的聚乙烯(PE)打孔

波纹管,集水管为直径200 mm的聚氯乙烯(PVC)管,均为单级管道布置。暗管排水系统5月初布置完成。不同处理砂滤料布置见图2。

表1 试验设计

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

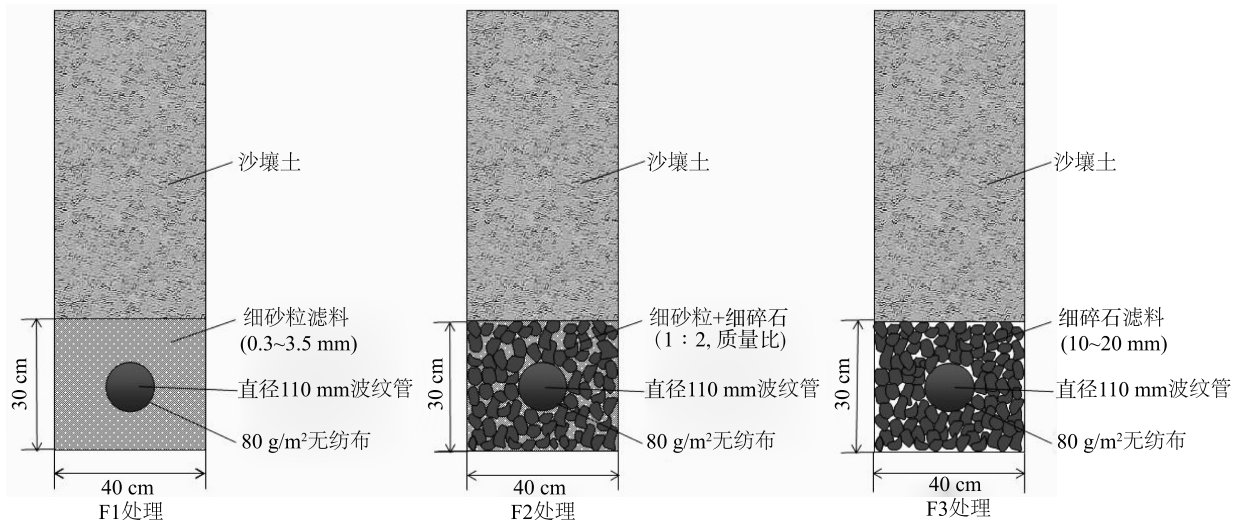


图2 不同处理砂滤料布置图  
Fig.2 Distribution chart of different sand filter materials

1.3 试验实施

以秋优88为供试水稻品种,5月19日旱地机械直播,播种量为375 kg/hm<sup>2</sup>,株距为12 cm,行距为20 cm,5月20日开始淹灌,9月4日灌溉后停水晒田,10月1日收割。其中在5月20日至6月15日因水稻根系较浅,需浅水灌溉,每次灌水定额为500.25 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌溉9次;在6月19日至9月4日进行常规灌溉,每次灌水定额为1 000.50 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,灌溉16次,水稻灌溉定额共计20 510.25 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。化肥使用量为937.5 kg/hm<sup>2</sup>,其中尿素(含N 46%)300 kg/hm<sup>2</sup>,磷酸二铵(含N 18%,含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%)375 kg/hm<sup>2</sup>,复合肥(含N 28%,含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 6%,含K<sub>2</sub>O 6%)225 kg/hm<sup>2</sup>,复合肥(含N 17%,含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 17%,含K<sub>2</sub>O 17%)37.5 kg/hm<sup>2</sup>,其他田间管理措施均与当地农户一致。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 株高测定 在每个处理区标记3穴水稻,使用钢卷尺(分度值为1 mm)分别在水稻分蘖前期、分蘖

中期、分蘖后期、拔节期、抽穗期、成熟期测定水稻株高(H),其中株高(H)为地表到主茎最高叶尖的高度。

1.4.2 叶片SPAD值及光合速率测定 在水稻分蘖前期、分蘖中期、分蘖后期、拔节期、抽穗期、成熟期,使用便携式SPAD-520型叶绿素仪(Monlta公司产品,日本)对水稻叶片SPAD值进行测定,每处理选取完全展开叶不同部位测定5次;在水稻抽穗期选择晴朗无云的天气,利用Li-6800光合仪(LI-COR公司产品,美国)在自然状态下09:00-19:00每2 h测定水稻剑叶净光合速率(P<sub>n</sub>)、蒸腾速率(T<sub>r</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>i</sub>),每组处理重复三次。

1.4.3 产量及产量构成测定 水稻收割前在各处理区非边行选取3个2 m<sup>2</sup>的标准样方,测定平均稻谷产量;根据各处理平均茎蘖数,各处理选取3穴进行考种,得到有效穗数、穗粒数、结实率及千粒质量。

1.4.4 土壤电导率测定及脱盐率计算 在各处理区暗管埋设正上方1 m附近标记3处位置,间隔20 d左右采用土钻收集土壤,共3层(0~20.0 cm、20.1~

40.0 cm、40.1~60.0 cm),将土样自然风干后,利用电导率仪 DDS-307A(中国上海精密科学仪器厂产品)测定土水质量比为1:5土壤浸提液电导率。土壤脱盐率的计算参考文献[20]的方法,见公式(1):

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

式中  $N$  为脱盐率(%);  $S_1$  为灌溉前土壤电导率(ms/cm);  $S_2$  为灌溉后土壤电导率(ms/cm)。

1.4.5 作物蒸腾量计算 作物蒸腾量采用水平衡法计算<sup>[21]</sup>,见公式(2):

$$ET = I + P + U - E - D - (W_t - W_0) \quad (2)$$

式中:  $ET$  为作物蒸腾量( $m^3/hm^2$ );  $I$  为时段内灌溉定额( $m^3/hm^2$ );  $P$  为时段内有效降雨量( $m^3/hm^2$ );  $U$  为时段内地下水补给量( $m^3/hm^2$ ),由于试验期内地下水位低于暗管埋深,故可忽略地下水补给;  $E$  为时段内稻田水面蒸发量( $m^3/hm^2$ ),采用直径 20 cm 的 ZS177-20cm 蒸发皿(南京威美特科学仪器有限公司产品)测定;  $D$  为时段内暗管排水总量( $m^3/hm^2$ ),采用 DN150 流量计(宁波山川水表有限公司产品)测定;  $W_0, W_t$  分别为时段初和时段末土壤湿润层(0~60 cm)内的储水量( $m^3/hm^2$ ),采用 PICO-BT 便携式土壤水分速测仪(IMKO 公司产品,德国)测定。

1.4.6 水分生产效率和肥料偏生产力计算 按以下公式<sup>[22-23]</sup>进行水分生产效率和肥料偏生产力的计算:

灌溉水分生产效率( $kg/m^3$ ) = 作物稻谷产量( $kg/hm^2$ )/灌溉定额( $m^3/hm^2$ )

群体水分生产效率( $kg/m^3$ ) = 作物稻谷产量( $kg/hm^2$ )/作物蒸腾量( $m^3/hm^2$ )

肥料偏生产力( $kg/kg$ ) = 作物稻谷产量( $kg/hm^2$ )/肥料纯养分的施用量( $kg/hm^2$ )

## 1.5 数据分析

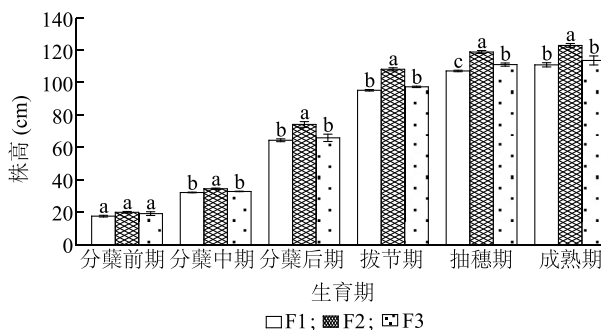
采用 SPSS 26.0 对数据进行处理间差异显著性分析,利用 Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻株高的影响

由图 3 可知,在水稻分蘖后期和拔节期株高增长速度最快,在成熟期(9月25日)水稻株高达到最大值。F1、F2、F3 处理在成熟期株高分别为 110.8 cm、122.8 cm、113.5 cm, F2 处理较 F1、F3 处理株高分别增长了 10.83%、8.19%,而 F1 和 F3 处理之间

未产生显著性差异。在水稻分蘖初期,3 组处理水稻株高未产生显著性差异,但随着植株的生长, F2 处理水稻生长较快,株高显著高于 F1、F3 处理,而 F1 处理与 F3 处理间株高差异不大。



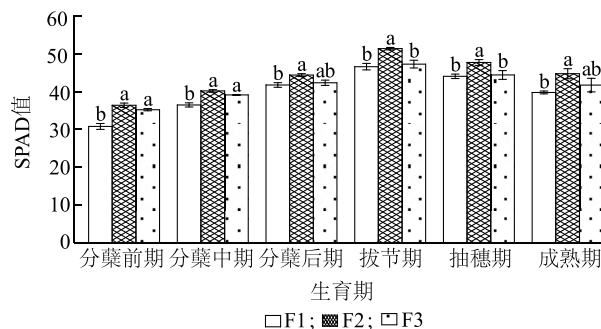
F1、F2、F3 见表 1。图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 3 不同砂滤料处理对水稻株高的影响

Fig.3 Effects of different sand filter materials on plant height of rice

### 2.2 不同处理对叶片 SPAD 值、日光合特性的影响

由图 4 可知,叶片 SPAD 值在生育期内呈凸线变化。在拔节期,各处理 SPAD 值均达到峰值,其中 F2 处理叶片 SPAD 值最大,显著高于 F1 处理和 F3 处理,比 F1、F3 处理分别提高了 10.24%、8.67%。在分蘖前期, F3 处理 SPAD 值较 F1 处理提高 14.40%,但在拔节期 F3 处理较 F1 处理仅提高 1.44%,说明 F3 处理在生育后期对水稻叶片 SPAD 值的影响效果减弱。总之, F2 处理较 F1、F3 处理更能有效提高水稻叶绿素含量,但 F1 处理和 F3 处理之间叶绿素含量差异性在水稻生育后期减小。



F1、F2、F3 见表 1。图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 4 不同砂滤料处理对水稻 SPAD 值影响

Fig.4 Effects of different sand filter materials on SPAD value of rice

由表 2 可知,抽穗期(8月18日)水稻剑叶净光合



速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、气孔导度和蒸腾速率均呈现一定的日变化特征,其中光合速率从早到晚出现 2 个峰值(11:00和15:00)这可能与环境温度、辐射、 $\text{CO}_2$  浓度等日变化有关,还一定程度上体现了光合午休的特征(13:00出现谷值)。除胞间  $\text{CO}_2$  浓度外,其他光合指标 F2 处理均高于 F1 处理和 F3 处理。其中 F2 处理全时段日平均净光合速率、气孔导度、蒸腾速率分别为  $7.76 [\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、 $0.26 [\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、 $4.30 [\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ , 分别较 F1 处理和 F3 处理增加

60.62%、8.33%、23.92%和 19.02%、13.04%、19.11%,而日平均胞间  $\text{CO}_2$  浓度分别比 F1 处理和 F3 处理降低 7.65%、1.39%。F2 处理的蒸腾速率在观测当天各时段均显著高于 F1 处理,而 F2 处理净光合速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度在13:00时与 F1 处理未产生显著性差异,F2 处理气孔导度在09:00–15:00与 F1 处理同样差异不显著。总之,F2 处理水稻剑叶的日平均净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均高于 F1 处理和 F3 处理,表明在 F2 处理条件下可以更好的促进水稻生长。

表 2 不同砂滤料处理对光合指标日变化的影响

Table 2 Effects of different sand filter materials on diurnal variation of photosynthetic indices

光合指标	处理	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00
净光合速率 $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	F1	2.18±0.24b	6.41±0.72b	4.53±0.19a	11.66±0.53b	3.11±0.32b	1.20±0.24c
	F2	5.48±0.36a	12.46±1.27a	6.76±0.79a	14.07±0.16a	4.66±0.22a	3.16±0.16a
	F3	2.95±0.11b	11.28±1.05a	6.42±1.08a	12.90±0.72ab	3.33±0.55ab	2.26±0.33b
胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	F1	324.47±6.18a	285.38±1.91a	286.33±5.13a	281.94±2.90a	361.07±5.92a	380.49±6.80a
	F2	297.81±6.60b	268.28±3.29b	279.64±0.91a	260.51±3.62b	323.01±3.97b	343.59±4.52b
	F3	305.75±6.33ab	279.11±1.24a	282.57±4.30a	262.35±1.75b	321.21±2.85b	346.93±4.97b
气孔导度 $[\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	F1	0.287±0.012a	0.420±0.015a	0.177±0.008a	0.267±0.029a	0.153±0.009b	0.113±0.007b
	F2	0.260±0.020a	0.460±0.021a	0.193±0.009a	0.300±0.021a	0.217±0.015a	0.157±0.012a
	F3	0.273±0.015a	0.417±0.009a	0.153±0.023a	0.233±0.012a	0.170±0.006b	0.130±0.006b
蒸腾速率 $[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	F1	2.37±0.04b	4.30±0.15b	2.57±0.16b	6.61±0.17b	2.61±0.11b	2.38±0.18b
	F2	2.79±0.05a	5.17±0.14a	3.53±0.07a	7.36±0.12a	3.81±0.10a	3.12±0.03a
	F3	2.69±0.11a	4.52±0.09b	3.25±0.01a	6.42±0.11b	2.49±0.05b	2.27±0.04b

F1、F2、F3 见表 1。同一光合指标同列后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同处理对水稻产量的影响

由表 3 可知,F2 处理的稻谷产量、有效穗数均显著高于 F1、F3 处理,分别较 F1 和 F3 提升 21.82%、9.26%和 15.29%、7.93%,但 F2 处理结实率、千粒质量与 F1、F3 处理无显著性差异,分别比 F1 和 F3 仅提高了 2.49%、10.73%和 2.30%、10.49%。F2 处理每穗粒数比 F1 处理提高了

18.18%,差异显著;比 F3 处理提高了 8.33%,但无显著性差异。从表中亦可知,F1 和 F3 处理各水稻产量构成指标间均差异不显著。以上分析结果表明暗管排水砂滤料选用细砂粒和细碎石混合(1:2,质量比)的 F2 处理较 F1 处理和 F3 可以有效提高稻谷产量和有效穗数,但是对结实率等产量指标提升效果不明显。

表 3 不同砂滤料处理对水稻产量指标的影响

Table 3 Effects of different sand filter materials on yield indices of rice

产量指标	稻谷产量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )	千粒质量 (g)	结实率 (%)	每穗粒数 (粒)	穗数 (穗, $1\text{m}^2$ )
F1	8 010.67±201.00b	30.73±1.59a	93.54±0.76a	110±2.65b	324±6.11b
F2	9 758.21±249.28a	34.03±0.73a	95.87±0.47a	130±5.69a	354±6.35a
F3	8 464.23±223.12b	30.80±0.64a	93.71±1.29a	120±4.73ab	328±2.31b

F1、F2、F3 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.4 不同处理对水稻作物蒸腾量、水分生产效率和肥料偏生产力的影响

不同处理水稻水分生产效率和肥料偏生产力如表 4 所示。由表 4 可知,在灌水方式、灌溉定额及施

肥总量相同的条件下,水稻作物蒸腾量由小到大依次为 F2 处理、F3 处理、F1 处理,且各处理之间均有显著性差异,其中 F2 处理作物蒸腾量较 F1 处理和 F3 处理分别降低了 46.10%和 42.36%;水稻灌溉水

分生产效率 and 群体水分生产效率由大到小依次为 F2 处理、F3 处理、F1 处理,且 F2 处理水分生产效率均显著高于 F1、F3 处理,其中 F2 处理灌溉水分生产效率、群体水分生产效率较 F1、F3 处理分别提高了 23.08%、126.87% 和 17.07%、100.00%;水稻肥料偏生产力由大到小依次为 F2 处理、F3 处理、F1

处理,F2 处理肥料偏生产力显著高于 F1、F3 处理,F2 处理的偏氮肥生产力、偏磷肥生产力、偏钾肥生产力较 F1、F3 处理分别提高了 21.83%、21.81%、21.82% 和 15.30%、15.27%、15.18%。表明在 F2 处理条件下可以提高水稻水分利用效率和肥料偏生产力,促进水稻有机物的合成,提高水稻产量。

表 4 不同砂滤料处理对水稻水分生产效率和肥料偏生产力的影响

Table 4 Effects of different sand filter materials on rice water productivity and fertilizer partial productivity

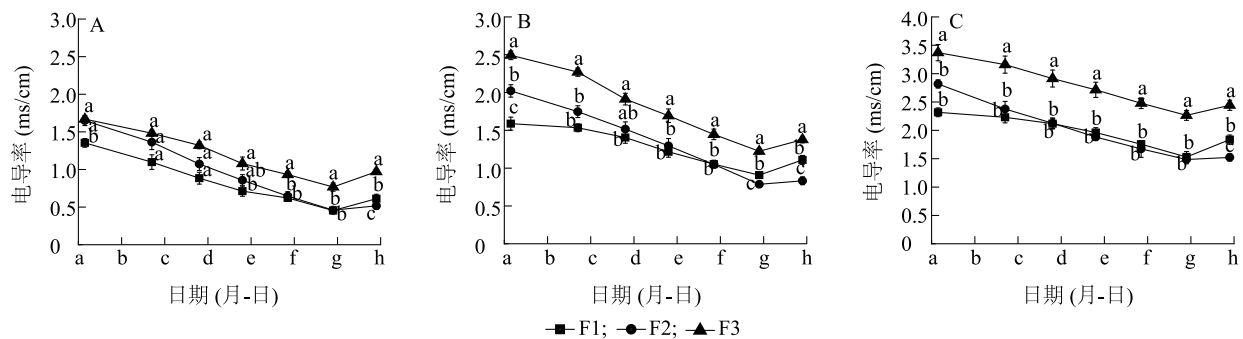
	作物蒸腾量 ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )	灌溉水分生产效率 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	群体水分生产效率 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	偏氮肥生产力 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )	偏磷肥生产力 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )	偏钾肥生产力 ( $\text{kg}/\text{kg}$ )
F1	11 908.95±67.89a	0.39±0.01b	0.67±0.02c	29.14±0.79b	41.64±1.13b	403.05±10.97b
F2	6 419.50±144.25c	0.48±0.01a	1.52±0.01a	35.50±0.91a	50.72±1.30a	490.98±12.54a
F3	11 136.70±113.69b	0.41±0.01b	0.76±0.03b	30.79±0.81b	44.00±1.16b	425.87±11.23b

F1、F2、F3 见表 1。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.5 不同处理对土壤电导率的影响

土壤电导率是评价土壤水溶性盐含量的重要指标之一,在一定范围内可以表征土壤含盐量。不同处理 0~60.0 cm 土壤电导率如图 5 所示。由图 5 可知,播种前(5 月 18 日)各层土壤电导率存在一定的差异,其成因可能在于暗管埋设完成后试验区有一次中雨过程(图 1)。在水稻灌水期间 3 组处理 0~20.0 cm、20.1~40.0 cm、40.1~60.0 cm 土壤电导率均呈下降趋势,9 月 4 日灌溉后停水晒田,至 9 月 10 日各处理电导率仍呈下降趋势。此后在作物蒸腾拉力的作用下,土壤深层的含盐分会向水稻根层移动,导致

9 月 30 日各处理测得的土壤电导率有回升趋势。灌溉期间 F2 处理表层土(0~20.0 cm)土壤电导率下降速度大于 F1、F3 处理,深层土壤(20.1~60.0 cm)F1 处理的土壤电导率下降速度低于 F2、F3 处理,这说明 F1 处理条件下,虽然表层的盐分会随着灌溉向深层土壤下渗,但细砂粒的滤砂料会降低深层土壤盐分的排出速率。此外,试验结束时(9 月 30 日),F2 处理在 0~20.0 cm、20.1~40.0 cm、40.1~60.0 cm 的土壤电导率较 9 月 10 日而言,分别仅增加了 0.06 ms/cm、0.05 ms/cm、0.04 ms/cm,低于 F1、F3 处理,这说明 F2 处理条件下土壤返盐水平也较低。



A: 0~20.0 cm; B: 20.1~40.0 cm; C: 40.1~60.0 cm。a: 05-15; b: 06-04; c: 06-24; d: 07-14; e: 08-03; f: 08-23; g: 09-12; h: 10-02。F1、F2、F3 见表 1。图中同一日期不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

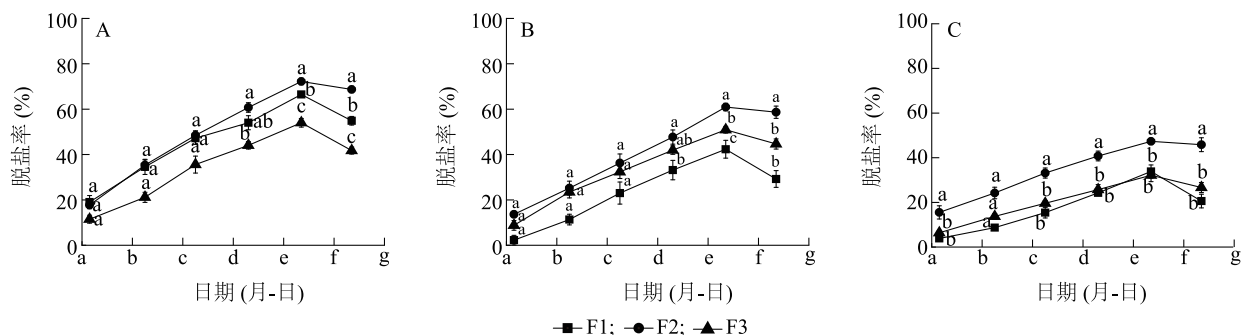
图 5 不同砂滤料处理对土壤电导率的影响

Fig.5 Effects of different sand filter materials on electrical conductivity of soil

不同处理下 0~60.0 cm 土壤脱盐率如图 6 所示。与播种前相比,各处理不同土壤深度的脱盐率都呈增加趋势,均在 9 月 10 日达到最高值,且 F2 处理脱盐率显著高于 F1、F3 处理,其中 F2 处理在 0~20.0 cm、20.1~40.0 cm、40.1~60.0 cm 处土壤脱盐率比 F1、F3 处

理分别增加了 5.76%、18.62%、13.51% 和 18.22%、10.01%、15.17%。试验结束时(9 月 30 日),在水稻生育期内,F1、F2、F3 处理 0~20.0 cm 土壤脱盐率分别为 54.89%、68.72%、41.81%;20.1~40.0 cm 土壤脱盐率分别为 30.18%、58.82%、44.72%;40.1~60.0 cm 土壤脱盐

率分别为 20.81%、45.96%、27.54%,表明 F2 处理在 0~ 60.0 cm 处土壤脱盐率均高于 F1、F3 处理。



A: 0~20.0 cm; B: 20.1~40.0 cm; C: 40.1~60.0 cm。a: 06-15; b: 07-05; c: 07-25; d: 08-14; e: 09-03; f: 09-23; g: 10-13。F1、F2、F3 见表 1。图中同一日期不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 6 不同砂滤料处理对土壤脱盐率的影响

Fig.6 Effects of different sand filter materials on soil desalination rate

### 3 讨论

暗管排水排盐技术是改良盐碱地的重要措施之一,在暗管排水过程中合理选择砂滤料可以有效提升暗管排水排盐效率,改善作物根区土壤通气状况,减少作物盐碱胁迫,进而促进作物对养分的吸收,提高作物产量。由于暗管排水与土壤保肥是一对矛盾体,排水好的材料保肥效果也差,而保水好的材料又不利于盐分的排出。所以选择既要能达到灌溉排水降盐的目的,又要能减少肥料过量流失的适宜砂滤材料,对盐碱地作物的生产具有重要的意义。本研究发现,在水稻分蘖前期细砂粒、细碎石及细砂粒细碎石 1:2(质量比)混合 3 种砂滤料处理株高未出现显著性差异,而在分蘖中期以后,细砂粒细碎石 1:2 混合处理条件下株高显著高于细砂粒处理和细碎石处理,原因可能是细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合时,综合粒径适中,过滤性能稳定<sup>[24]</sup>,既有利于盐碱地排水排盐,又能防止肥料的过量流失,因而水稻株高、叶片 SPAD 值、光合速率等指标都优于其他处理,这与曹雪松等<sup>[25]</sup>的研究结果相似。

光合作用是影响水稻产量的重要因素之一<sup>[26-29]</sup>。叶片 SPAD 值和叶片光合速率都能一定程度反映水稻群体光合能力。研究中细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合的暗管砂滤料处理的叶片 SPAD 值和净光合速率都比其他处理高,说明该处理降盐作用及植株吸氮、土壤保氮能力较强。此外,光合作用参数的日变化说明抽穗期存在明显的光合午休现象<sup>[30]</sup>。此时叶片气孔关闭,光合作用减弱,导致叶片内  $\text{CO}_2$  浓度增加,此时处理间净光合速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度差异性减

弱。而气孔导度在 09:00–15:00 时段内各处理间差异也不显著,表明气孔导度与净光合速率、蒸腾速率的影响机制存在明显差异。研究结果表明气孔导度除受光照度<sup>[31]</sup>影响外,还受空气湿度<sup>[32]</sup>等因素的制约,且气孔导度存在响应滞后的现象<sup>[33]</sup>。

砂滤料孔隙与暗管排水排盐能力密切相关。陶园等<sup>[34]</sup>研究结果表明过滤体主要通过自身孔隙来进行过滤,因此对过滤体的颗粒粒级配比要求较高。细砂粒孔隙较小易被细小的土壤颗粒填充,而细碎石孔隙较大容易造成土壤流失,且土壤杂质颗粒会呈团状堵塞深层滤料及无纺布孔隙,因此 F2 处理暗管排水砂滤料选用细砂粒和细碎石混合(1:2,质量比)时,滤料孔隙适中,会形成稳定的过滤层,有效增加排水排盐量,这与胡玲玲等<sup>[35]</sup>研究结果相似。本文研究结果表明细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合处理时稻谷产量增加的主要因素在于有效穗数及每穗粒数的增加。因此加强灌溉排水脱盐<sup>[36-37]</sup>的同时,加强分蘖期土壤保肥能力,促进群体及个体协同发育,对盐碱地水稻生产具有重要作用,这与衣政伟等<sup>[38]</sup>研究结果相似。

### 4 结论

本试验结果表明宁夏引黄灌区重度盐碱地细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合的暗管砂滤料处理可以显著提高水稻株高、SPAD 值、光合速率,有效促进水稻群体光合作用,提高水稻产量和水分、肥料的利用效率;且细砂粒和细碎石 1:2(质量比)混合的暗管砂滤料处理下 0~20.0 cm、20.1~40.0 cm、40.1~60.0 cm 土层的脱盐率分别达到了 68.72%、

58.82%、45.96%,明显高于细砂粒处理和细碎石处理。因此,建议宁夏引黄灌区重度盐碱地选用细砂粒和细碎石1:2(质量比)混合的砂滤料作为暗管排水水稻田的建设标准。

## 参考文献:

- [1] 张智猛,戴良香,慈敦伟,等. 种植密度和播种方式对盐碱地花生生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1328-1338.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [3] 赵广兴,李王成,贾振江,等. 盐碱复合胁迫对白茎盐生草种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(8): 1469-1476.
- [4] 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.
- [5] 魏征,屠乃美,易镇邪. 盐碱地对水稻的胁迫效应及其改良与高效利用的研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2019, 6(4): 45-52.
- [6] 张薇. 平罗县水稻生产现状及产业发展对策[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(11): 49-50.
- [7] 徐友信,于淑会,石磊. 高水位盐碱地暗管控制性排水的降盐抑碱作用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 164-169.
- [8] 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.
- [9] DARZI-NAFTCHALI A, SHAHNAZARI A. Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 56(1): 1-8.
- [10] 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.
- [11] 张洁,常婷婷,邵孝侯. 暗管排水对大棚土壤次生盐渍化改良及番茄产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 81-86.
- [12] JAFARI-TALUKOLAEI M, SHAHNAZARI A, AHMADI M Z, et al. Drain discharge and salt load in response to subsurface drain depth and spacing in paddy fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(11): 04015017.
- [13] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 602-609.
- [14] 冯根祥,张展羽,方国华,等. 暗管排水条件下微咸水灌溉对土壤盐分动态及夏玉米生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 880-885.
- [15] 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.
- [16] DARZI-NAFTCHALI A, MOTEVALI A, KEIKHA M. The life cycle assessment of subsurface drainage performance under rice-cano-la cropping system[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2022.107579.
- [17] 柳宪布,吴丽萍,陈洁,等. 炉渣为暗管包敷滤料对土壤含盐量的影响[J]. 环境卫生工程, 2012, 20(4): 5-7.
- [18] 王苏胜,周明耀,刘璐嘉. 排水暗管外包材料渗透性与除氮效果试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 21-23.
- [19] 韦本辉,申章佑,周佳,等. 粉垄改造利用盐碱地效果初探[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 107-112.
- [20] 刘祖汀,王丽萍,屈忠义,等. 引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 101-108.
- [21] 强小嫚,张凯,米兆荣,等. 黄淮海平原地区深松和灌水次数对冬小麦-夏玉米节水增产的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 491-502.
- [22] 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.
- [23] 刘润梅,范茂攀,付云章,等. 云南省马铃薯施肥量与化肥偏生产力的关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 753-760.
- [24] 刘清霞,翟国亮,李景海,等. 微灌石英砂颗粒表面滞纳能力计算与分析[J]. 节水灌溉, 2020(7): 28-31.
- [25] 曹雪松,李和平,郑和祥,等. 加气灌溉对根区土壤肥力质量与作物生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 183-189.
- [26] 邱峰,景元书. 不同灌溉方式对稻田微气象特征及水稻生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(5): 72-80.
- [27] 吴思佳,李仁英,谢晓金,等. 抽穗期高温对水稻叶片光合特性、叶绿素荧光特性和产量构成因素的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 20-27.
- [28] 董京铭,刘瑞翔,马晨晨,等. 利用主成分回归方法预估连云港地区水稻气象产量[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 606-612.
- [29] 周东雪,姜运生,杨惠琳,等. 夜间增温下品种混栽对水稻叶片光合特性和荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 64-72.
- [30] 赵玉国,王新忠,吴沿友,等. 高温胁迫对拔节期水稻光合作用和蒸腾速率的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(1): 41-43.
- [31] 战吉成,黄卫东,王秀芹,等. 弱光下生长的葡萄叶片蒸腾速率和气孔结构的变化[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 26-31.
- [32] 贾宏涛,赵成义,盛钰,等. 干旱地区紫花苜蓿光合日变化规律研究[J]. 草业科学, 2009, 26(7): 56-60.
- [33] 张中典,张大龙,李建明,等. 黄天气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 139-147.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 王世斌,高佩玲,赵亚东,等. 微咸水对生物炭作用下盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(2): 181-187.
- [37] 文利军,史文娟,何子建,等. 不同措施对土壤脱盐及棉花生理特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 851-858.
- [38] 衣政伟,林佩佩,袁红,等. 江苏省淮南小麦品种农艺性状与产量指标相关性研究[J]. 农学学报, 2021, 11(12): 17-23.

(责任编辑:石春林)