

# 种植方式和灌溉定额对碱化盐土及紫穗槐生长的影响

王旭<sup>1</sup>, 樊丽琴<sup>1</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 孙兆军<sup>2,3\*</sup>, Sameh El-Sway<sup>4</sup>

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021;

3. 宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021;

4. Vegetable Research Department, Agricultural and Biological Division, National Research Centre, Giza 12311, Egypt)

**摘要:** 针对甘肃白银碱化盐土表层土壤盐分高、植物生长困难的生产问题, 在统一施用脱硫石膏 18 t/hm<sup>2</sup> 的基础上, 通过 2 a 田间试验, 在起垄沟植和未起垄种植 2 种植方式下设置 3 个灌溉定额: 8 250、9 750 和 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 研究不同种植方式及灌溉定额对土壤 pH 值、碱化度、含盐量及紫穗槐生长的影响。试验结果表明: 1) 各处理均显著降低了土壤 pH 值、碱化度和含盐量; 起垄沟植方式下垄沟内可汇集灌溉水和降水, 提高土壤含水率; 在 0~40 cm 土层起垄处理的土壤盐分比未起垄处理低 15.7%, 起垄沟植处理可以形成“高水低盐”的水盐环境, 从而使紫穗槐的成活率、株高、冠幅均高于未起垄处理; 2) 2 种植方式下, 随灌水量增加脱盐效果越显著, 紫穗槐的成活率、株高、冠幅指标随灌水量增加而增加; 灌溉定额为 9 750 和 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时, 紫穗槐生长指标无显著差异。考虑到研究区地处干旱区, 水资源有限, 灌水量过多不仅浪费水资源还会增加发生次生盐渍化的风险, 因此, 施用脱硫石膏并起垄沟植适宜于甘肃白银碱化盐土紫穗槐种植, 且适宜灌溉定额为 9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 灌溉; 淋洗; 土壤盐分; 种植方式; 碱化盐土

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.010

中图分类号: S156.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0088-08

王旭, 樊丽琴, 李磊, 孙兆军, Sameh El-Sway. 种植方式和灌溉定额对碱化盐土及紫穗槐生长的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 88—95. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.010 http://www.tcsae.org

Wang Xu, Fan Liqin, Li Lei, Sun Zhaojun, Sameh El-Sway. Effects of planting patterns and irrigation quotas on alkalinized solonchak and growth of amorphia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 88 — 95. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.010 http://www.tcsae.org

## 0 引言

土壤盐碱化是制约中国农业生产和生态环境的主要因素之一, 目前已成为全球性问题<sup>[1]</sup>。中国盐碱土面积达 3.5×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 而中国耕地红线面积为 1.2×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 因此, 中国土地盐碱化现状非常严峻。甘肃白银市地处甘肃引黄灌区, 受气候、地形、水文地质条件等因素的影响产生大面积盐碱地, 面积达 1.08×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 类型包括镁质碱土、草甸盐土、碱化盐土、典型盐土等<sup>[2]</sup>; 靖远县盐碱地面积为 5.9×10<sup>3</sup> hm<sup>2</sup>, 主要分布在黄河-阶地(自流灌区)<sup>[3]</sup>。针对碱化土壤、碱化盐土等碱化度高的土壤, 通过施用脱硫石膏或磷石膏、糠醛渣等降低土壤碱化度、改善土壤结构; 针对含盐量较高的盐土则建立灌排系统进行灌水洗盐或滴灌控盐可为作物生长创造适宜的水盐环境<sup>[4]</sup>。虽然盐碱土理化性质不良, 制约农业可持续发展, 但靖远

地势平坦, 适宜机耕, 毗邻黄河, 开发潜力巨大。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.) 为多年丛生落叶小灌木, 具有耐旱、耐盐碱的特性<sup>[5]</sup>。多年生植物具有防风固沙、增加大气湿度, 调节田间小区气候的作用; 连年种植紫穗槐可降低土壤耕作层的含盐量, 增加土壤有机质, 在改良盐碱地中发挥其生态作用<sup>[6]</sup>。由于紫穗槐直接经济价值不高, 当地农户种植较少, 目前多用于防护林、坡堤固定。干旱区降雨稀少蒸发强烈, 传统平种林木后灌水量有限, 压盐效果差不利于林木生长发育, 导致林木冠幅较小, 返盐现象频发<sup>[7]</sup>。在农业生产中, 保持土壤墒情, 抑制水分蒸发, 进而抑制盐分向地表迁移是改良盐碱土壤水盐障碍的重要议题。如何通过农艺措施改善盐碱土壤水盐环境, 保障改良效果的可持续性是当前农林业需要解决的问题之一。起垄沟植是指垄沟相间排列, 垄沟内种植作物, 垄与沟组成的“垄沟系统”具有集雨、蓄水的作用<sup>[8]</sup>。研究表明<sup>[9-10]</sup>: 起垄改变了地表微形态, 可拦截部分径流、集纳降雨, 增加土壤蓄水利于水分向下运移, 垄沟内水分产生叠加, 促进作物生长发育, 提高作物产量和水分利用效率。为减轻盐胁迫对作物的影响, 灌溉过程不可或缺, 通过灌水淋洗产生下行水分溶解可溶性盐, 能有效降低作物根层土壤含盐量<sup>[11]</sup>。研究表明<sup>[12]</sup>: 灌水量直接影响土壤盐分的淋洗效果, 灌水量多浪费水资源, 还可能会造成深层渗漏, 抬高地下水位,

收稿日期: 2019-09-05 修订日期: 2020-01-13

基金项目: 自治区农业科技自主创新专项全产业链创新示范课题 (YES-16-0907); 宁夏农林科学院“十三五”重点科技项目 (NKYZ-16-0905); 国家自然科学基金 (31960274)

作者简介: 王旭, 博士, 主要从事盐碱地水盐调控研究。

Email: wangxu640321@126.com

\*通信作者: 孙兆军, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐碱地改良和节水灌溉新技术研究。Email: sunzhaojunyx@126.com

导致土壤次生盐渍化；灌水量少盐分不能充分淋溶，淋盐效果差，容易发生返盐现象。

在盐碱地中进行起垄沟植，能否利用垄沟内集雨、蓄水的作用实现蓄水控盐，保障改良效果是破解盐碱地区作物成活率低的有效途径之一<sup>[13]</sup>。而目前关于起垄沟植的研究主要侧重于集雨效率及作物增产等方面，针对起垄沟植紫穗槐引起的盐碱土壤水盐变化及其与植物生长的互作机制等研究仍显不足。为此，本研究在甘肃白银市靖远县开展田间定位试验，在统一施用脱硫石膏的基础上，研究起垄沟植和未起垄种植紫穗槐及不同灌溉定额对碱化盐土 pH 值、碱化度、含盐量和紫穗槐生长的影响，研究成果可为甘肃碱化盐土改良技术优化和田间土壤水盐调控管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省白银市靖远县东升乡(37°02'N, 104°96'E) 进行。该地区属于温带大陆性气候，夏季温度高，降雨稀少且年内分布不均。年平均气温 9.9℃，年平均降水量、蒸发量分别为 240、1634 mm，1 月份气温最低，7 月份气温最高(图 1)。由图 1 可知，2016 和 2017 年的降雨量分别为 233.3、259.3 mm。

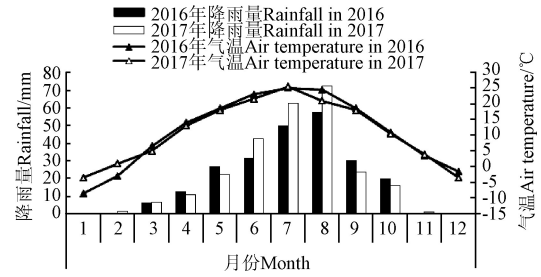


图 1 试验期间研究区气温和降雨  
Fig.1 Air temperature and rainfall in study site during experimental period

0~60 cm 土层土壤黏粒(<0.002 mm)占 15.2%，粉砂粒(0.002~0.02 mm)占 38.6%，砂粒(>0.02~2.0 mm)占 46.2%，土壤质地为黏壤土<sup>[14]</sup>。0~60 cm 土层土壤有机质质量分数为 0.54%~0.89%，碱解氮为 16.72~29.25 mg/kg，速效磷为 0.7~5.98 mg/kg，速效钾为 179.64~211.58 mg/kg，其他理化性质如表 1 所示。由表 1 可知，土壤含盐量均高于 6.2 g/kg，随土层深度增加土壤含盐量呈降低趋势；碱化度均高于 22%；土壤 pH 值均高于 8.6。0~60 cm 土层阳离子以 Na<sup>+</sup>为主，阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主，Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比值均在 0.5~1 之间，试验区盐土分类属于氯化物-硫酸盐盐土<sup>[14]</sup>。

表 1 供试土壤主要理化性质  
Table 1 Main physical and chemical properties of tested soils

土层深度 Soil depth/cm	离子成分 Ion ingredients/(cmol·kg <sup>-1</sup> )								pH 值 pH value	含盐量 Salinity/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱化度 Alkalinity/%	容重 Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				
0~10	11.54	0.22	0.36	0.50	1.36	2.16	1.62	2.97	9.15	8.41	30.62	1.37
>10~20	10.20	0.28	0.37	0.58	1.15	1.98	1.56	2.78	8.97	7.72	28.24	1.42
>20~40	9.48	0.35	0.39	0.52	0.93	1.88	1.40	2.52	8.84	7.09	24.82	1.49
>40~60	8.83	0.33	0.38	0.61	0.98	1.15	1.42	2.25	8.62	6.28	22.54	1.58

1.2 试验设计及过程

试验区土壤碱化度高，作物难以正常生长，需要施用脱硫石膏进行改良<sup>[4]</sup>。脱硫石膏施用量依据肖国举等<sup>[15]</sup>在改良西北旱区盐碱土壤试验所应用的公式进行计算，计算的本试验区脱硫石膏施用量为 18 t/hm<sup>2</sup>。为达到脱盐效果需进行淋洗，单位面积所需的淋洗水量，即淋洗定额<sup>[16]</sup>。淋洗定额参考胡顺军等<sup>[17]</sup>在新疆盐碱土淋洗试验所应用的公式进行计算，计算得淋洗定额为 6 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

在统一施用脱硫石膏 18 t/hm<sup>2</sup>，淋洗定额 6 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>的基础上，设置未起垄种植+灌溉定额 8 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T1)，未起垄种植+灌溉定额 9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T2)，未起垄种植+灌溉定额 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T3)，起垄沟植+灌溉定额 8 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T4)，起垄沟植+灌溉定额 9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T5)，起垄沟植+灌溉定额 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (T6) 6 个处理，每个处理重复 3 次。6 个处理冬灌灌水定额均为 1 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，除冬灌外整个生育期紫穗槐共灌溉 5 次<sup>[18]</sup>，2016 年灌水时间为 5 月 3 日、6 月 5 日、7 月 8 日、8 月 4 日、9 月 10 日，2017 年灌水时间为 5 月 1 日、6 月 7 日、7 月 8 日、8 月 2 日、9 月 12 日。T1 和 T4 处理每次灌水定额为 1 650 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，

T2 和 T5 处理每次灌水定额为 1 950 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>，T3 和 T6 处理每次灌水定额为 2 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。每个试验小区面积为 12 m<sup>2</sup> (3 m×4 m)，小区埂高 0.5 m，小区之间间隔 1 m。

未起垄的试验小区将有机肥 45 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、脱硫石膏 18 t/hm<sup>2</sup> 撒施于地表，旋耕使其与表层土壤混匀。起垄的试验小区用起垄机械起垄，垄高 0.3 m，垄宽 0.4 m，垄沟宽 0.4 m，每条垄沟间隔 0.8 m，以试验地垄沟内面积为单位按有机肥 45 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、脱硫石膏 18 t/hm<sup>2</sup> 的施用量撒施于垄沟内，旋耕使其与垄沟内表层土壤混匀。依据“小水溶盐、大水淋盐”的原则，连续淋洗盐分 3 次<sup>[19-20]</sup>。待地表晾干后在垄沟内按株距 0.5 m 的规格挖树坑(坑深 0.25 m，直径 0.2 m)，未起垄处理按照株行距 0.5 m×0.8 m 的规格挖树坑，树坑规格与起垄处理小区一致。于 2016 年 5 月 2 日种植紫穗槐(基径 0.54±0.08 cm)，每个树坑种 1 株紫穗槐苗，将紫穗槐苗植入培土填平并踩实，起垄与未起垄处理紫穗槐的株行距均为 0.5 m×0.8 m，起垄沟植和未起垄种植处理下所有试验小区种植的紫穗槐数量均为 28 株。种植完后按试验设计的灌水量进行灌溉，待地表晾干后及时破板结。

### 1.3 测试项目及方法

测定时间于 2016 年 5 月开始, 取样时间为每次灌水后第 10 天, 在每个试验小区依据“随机”“多点混合”的原则, 采用“S”形布点采集土样; 未起垄处理以地表为基准, 起垄处理以垄沟底为基准, 用土钻在每个试验小区距树 10 cm 处取土壤剖面 0~10、>10~20、>20~40 和 >40~60 cm 土层土样, 每个小区每次取 3 个点的土样, 剔除土壤样品中的杂物, 风干、磨碎、过 1 mm 孔径的筛。容重采用环刀法测定; 土壤质量含水率采用烘干法测定; 按 1:5 土水比充分震荡摇匀并过滤, 取上清液, 采用 Mettler Toledo S220 多参数测试仪测定 pH 值; 土壤含盐量采用电导法测定; 阳离子交换量采用氯化铵-乙酸铵交换法测定; 交换性  $\text{Na}^+$  采用乙酸铵-氢氧化铵-火焰光度法测定; 交换性  $\text{Na}^+$  与可交换性阳离子交换量的百分比计算碱化度;  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  含量采用差减法;  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  采用 EDTA 滴定法;  $\text{Cl}^-$  采用  $\text{AgNO}_3$  滴定法;  $\text{SO}_4^{2-}$  采用 EDTA 回滴法;  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  采用双指示剂滴定法。具体参考文献<sup>[21]</sup>。

灌水量利用水表确定; 试验小区成活的苗木株数与苗木总株数的百分比计算苗木成活率; 第 2 年成活的苗木株数与总株数的百分比计算苗木保存率; 采用游标卡尺测量苗木基径; 采用卷尺测量苗木冠幅(单株在空间自然分布最大直径)、株高。

### 1.4 数据分析及处理

为直观分析不同处理对土壤性质的综合影响, 采用隶属函数分析法<sup>[22]</sup>, 对不同处理效果进行比较。计算方法如下:

#### 1) 计算各指标的隶属函数值

$$X(u) = \begin{cases} (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) & \text{指标与改良效果呈正相关} \\ 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) & \text{指标与改良效果呈负相关} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $X(u)$  为不同处理某一指标的隶属函数值;  $X$  为不同处理某一指标的测定值;  $X_{\max}$  为所有处理中某一指标测定值的最大值;  $X_{\min}$  为所有处理中某一指标测定值的最小值。

2) 将所有处理各项指标隶属函数值进行累加, 计算平均值, 平均值由大到小排序, 值越大表示改良效果越好, 值越小表示改良效果越差。

## 2 结果与分析

### 2.1 淋洗对土壤盐碱的影响及水盐均衡分析

种植前的施用脱硫石膏配合淋洗措施对土壤盐分、碱化度影响较大(表 2)。淋洗后起垄和未起垄处理 0~60 cm 土层土壤的含盐量均降至 5 g/kg 以下, 表层土壤盐分含量最低, 随土层深度增加土壤盐分含量呈递增趋势。0~10 cm 土层起垄处理土壤盐分最低, 比原土降低 73.4%。土壤碱化度均降低至 23.3% 以下, 0~10 cm 土层碱化度降低明显, 起垄和未起垄处理比原土分别降低 31.9%、30.0%。

表 2 淋洗对 0~60 cm 土层剖面土壤盐分的影响

土层深度 Soil depth/cm	含盐量 Salinity/(g·kg <sup>-1</sup> )		碱化度 Alkalinity/%	
	起垄 Ridge	未起垄 No ridge	起垄 Ridge	未起垄 No ridge
0~10	2.24±0.20	2.85±0.18	20.87±0.60	21.43±0.57
>10~20	3.03±0.15	3.30±0.17	22.67±1.06	23.33±0.47
>20~40	3.93±0.20	3.71±0.15	19.27±0.45	19.53±0.42
>40~60	4.38±0.25	4.25±0.09	18.53±0.91	18.47±0.55

作物根区水盐均衡是保障作物正常生长的关键, 耕地的盐分均衡方程为<sup>[23]</sup>

$$\Delta S = D_i C_i + D_r C_r - D_d C_d - S_c \quad (2)$$

式中  $D_i$  为灌溉水量,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $C_i$  为灌溉水矿化度,  $\text{g/L}$ ;  $D_r$  为总降水量,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $C_r$  为降水矿化度,  $\text{g/L}$ ;  $D_d$  为排水量,  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $C_d$  为排水矿化度,  $\text{g/L}$ ;  $S_c$  为植物吸收的盐量,  $\text{t}$ 。  $\Delta S > 0$  表明耕地处于积盐状态,  $\Delta S = 0$  表明进盐量与排盐量处于平衡状态,  $\Delta S < 0$  表明耕地处于脱盐状态。淋洗期间无降水, 若忽略植物带走的盐分, 式(2)简化为

$$\Delta S = D_i C_i - D_d C_d \quad (3)$$

淋洗水量为  $6750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 淋洗水矿化度为  $0.34 \text{ g/L}$ ; 淋洗期间排水量为  $2347.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 排水矿化度为  $1.25 \text{ g/L}$ ; 计算可得  $\Delta S = -0.639 < 0$ , 表明淋洗后耕地脱盐  $0.639 \text{ t}$ 。

### 2.2 不同处理对土壤容重、pH 值和碱化度的影响

为分析种植紫穗槐对土壤容重、pH 值和碱化度的影响, 以每年的 9 月份数据分析不同处理对土壤容重、pH 值和碱化度的影响(表 3)。经过 2 a 种植 T1~T6 处理的土壤容重、pH 值和碱化度均低于原土, 尤其在 0~10、10~20 cm 土层土壤 pH 值和碱化度降低明显。2 种植方式下, 土壤的容重、pH 值和碱化度随灌溉定额增加均呈降低趋势; 相同灌溉定额条件下, 起垄处理的土壤容重、pH 值和碱化度均低于未起垄处理。第 1 年, T6 处理的土壤容重、pH 值和碱化度为 6 个处理中最低, 0~60 cm 土层的土壤容重、pH 值和碱化度比原土分别平均降低 13.3%、10.9% 和 33.9%, 0~40 cm 土层 T6 处理的土壤容重、pH 值、碱化度均显著低于 T1 处理 ( $P < 0.05$ ); 0~60 cm 土层的未起垄处理和起垄处理的土壤碱化度比原土分别降低 32.2%、33.2%, 比淋洗后分别降低 13.5%、14.8%。第 2 年, 6 个处理土壤容重、pH 值和碱化度在第 1 年的基础上进一步降低, T6 处理的土壤容重、pH 值和碱化度最低。

### 2.3 不同处理对土壤剖面水分的影响

土壤剖面水分主要受灌排、气候和植物吸收等因素的影响, 以 2017 年土壤剖面水分变化为例分析不同处理对土壤剖面水分的影响(图 2)。试验结果表明: 6 月之前, 0~10 cm 土层土壤含水率随灌溉定额增大而增大; 在紫穗槐生长发育期, 植物生长所需水分增多, 表层土壤含水率受地表蒸发与植物根系吸水的影响逐渐降低。由图 2 可知, 在 0~60 cm 土层随土层深度增加土壤含水率呈增加趋势, 0~20 cm 土层土壤含水率随时间延长呈

先减少后增加趋势, 7、8 月份表层土壤含水率最低, 是由于夏季温度高地表蒸发强烈所致, 9 月份温度有所降低, 表层土壤含水率略有升高。在 0~20 cm 土层起垄处理的土壤含水率均高于未起垄处理, 起垄沟植方式下在

垄沟内能有效汇集灌溉水、降水, 提高垄沟内表层土壤的含水率; 灌溉定额为 8 250、9 750 和 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 条件下, 在 0~60 cm 土层相应灌溉量下起垄沟植处理土壤含水率比未起垄处理分别提高 8.5%、9.2%和 10.3%。

表 3 不同处理对 0~60 cm 土层土壤容重、pH 值和碱化度的影响

Table 3 Effect of different treatments on bulk density, pH value and alkalinity of 0-60 cm soil layers

年份 Year	指标 Index	土层深度 Soil depth/cm	处理 Treatment					
			T1	T2	T3	T4	T5	T6
第 1 年 First year	容重 Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	0~10	1.32±0.02a	1.28±0.03a	1.28±0.02a	1.28±0.02a	1.22±0.02b	1.19±0.01b
		>10~20	1.37±0.03a	1.32±0.02ab	1.30±0.03b	1.32±0.03ab	1.28±0.02b	1.24±0.03b
		>20~40	1.41±0.02a	1.41±0.02a	1.37±0.02a	1.38±0.01a	1.33±0.01ab	1.28±0.02b
		>40~60	1.43±0.01a	1.43±0.02a	1.40±0.01a	1.46±0.01a	1.41±0.03a	1.37±0.02a
	pH 值 pH value	0~10	8.23±0.04a	8.11±0.02a	8.08±0.04a	8.09±0.03a	7.91±0.05b	7.81±0.04b
		>10~20	8.27±0.03a	8.17±0.04a	8.14±0.02a	8.12±0.03a	8.02±0.03b	7.87±0.03b
		>20~40	8.32±0.02a	8.25±0.05a	8.19±0.03a	8.16±0.03ab	8.07±0.02b	7.98±0.04b
		>40~60	8.38±0.03a	8.28±0.05a	8.22±0.02a	8.21±0.04a	8.12±0.04b	8.02±0.03b
	碱化度 Alkalinity/%	0~10	17.52±0.09a	17.32±0.14a	17.25±0.08a	17.24±0.12a	17.08±0.14ab	16.91±0.13b
		>10~20	17.78±0.11a	17.64±0.15a	17.34±0.11b	17.48±0.11ab	17.27±0.15b	17.17±0.09b
		>20~40	17.94±0.12a	17.88±0.13a	17.66±0.14a	17.67±0.09a	17.62±0.12ab	17.43±0.08b
		>40~60	18.37±0.13a	18.11±0.11a	17.98±0.13a	18.15±0.12a	17.84±0.10a	17.65±0.08a
第 2 年 Second year	容重 Bulk density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	0~10	1.19±0.01a	1.18±0.03a	1.11±0.01b	1.16±0.02ab	1.09±0.03b	1.07±0.04b
		>10~20	1.23±0.02a	1.22±0.02a	1.15±0.02b	1.21±0.02a	1.15±0.02b	1.11±0.02b
		>20~40	1.27±0.01a	1.25±0.01a	1.19±0.02b	1.27±0.01a	1.20±0.01a	1.17±0.03b
		>40~60	1.38±0.01a	1.29±0.02a	1.24±0.03a	1.34±0.03a	1.26±0.03a	1.20±0.02a
	pH 值 pH value	0~10	7.82±0.03a	7.67±0.05ab	7.55±0.02b	7.82±0.05a	7.61±0.05b	7.51±0.02b
		>10~20	8.03±0.02a	7.82±0.05ab	7.74±0.03b	7.97±0.04a	7.74±0.03b	7.65±0.03b
		>20~40	8.15±0.04a	8.01±0.05a	7.98±0.04a	8.05±0.03a	7.85±0.02a	7.74±0.04b
		>40~60	8.21±0.05a	8.13±0.06a	8.14±0.04a	8.11±0.04a	8.02±0.04a	7.88±0.03a
	碱化度 Alkalinity/%	0~10	15.34±0.07a	15.17±0.13ab	15.02±0.16b	15.28±0.12a	14.83±0.14b	14.47±0.13b
		>10~20	15.66±0.09a	15.33±0.12a	15.17±0.14ab	15.44±0.11a	15.06±0.15b	14.63±0.12b
		>20~40	15.88±0.11a	15.62±0.13a	15.35±0.15b	15.63±0.09a	15.15±0.14b	14.92±0.10b
		>40~60	16.07±0.08a	15.85±0.14a	15.51±0.16ab	15.95±0.13a	15.37±0.11b	15.16±0.09b

注: T1: 未起垄+灌溉定额 8 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; T2: 未起垄+灌溉定额 9 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; T3: 未起垄+灌溉定额 11 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; T4: 起垄+灌溉定额 8 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; T5: 起垄+灌溉定额 9 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; T6: 起垄+灌溉定额 11 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; 不同小写字母表示不同处理同一土层在 0.05 水平差异显著, 下同。

Note: T1: No ridges and irrigation quota (8 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), T2: No ridges and irrigation quota (9 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), T3: No ridges and irrigation quota (11 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), T4: Ridges and irrigation quota (8 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), T5: Ridges and irrigation quota (9 750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>), T6: Ridges and irrigation quota (11 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>). Different letters indicate significant difference among treatments in the same soil depth at 0.05 level, same as below.

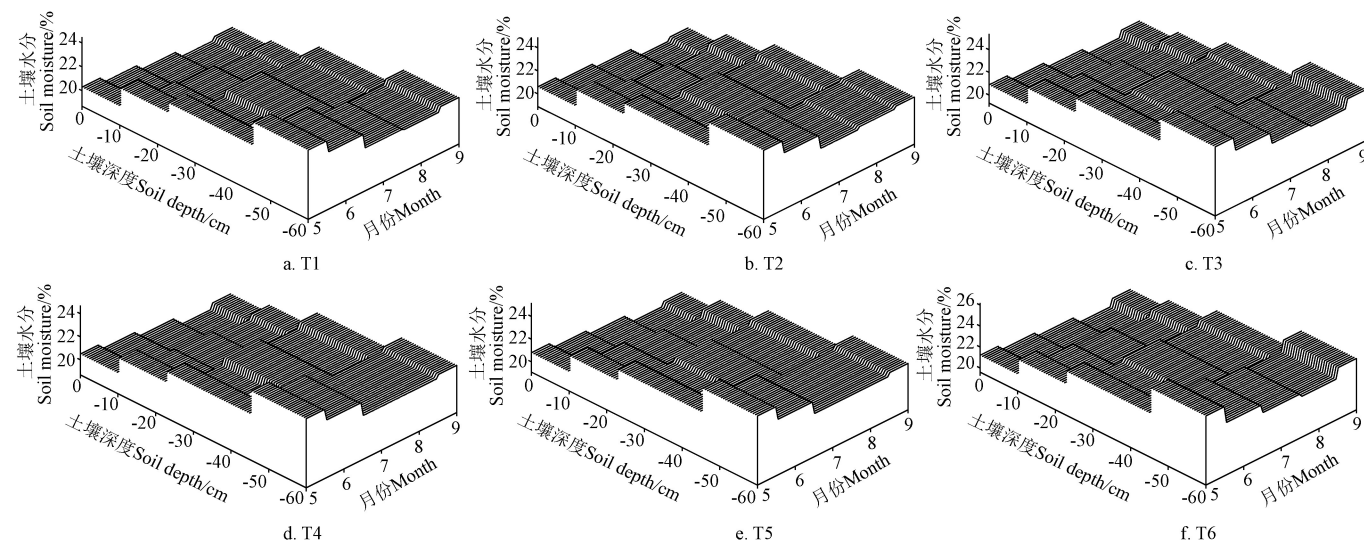


图 2 2017 年 5-9 月不同处理对 0~60 cm 土层剖面土壤质量含水率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil profile moisture of 0-60 cm soil layers from May to September in 2017

2.4 不同处理对土壤含盐量的影响

土壤盐分主要受水分运动的影响,以2017年土壤剖面含盐量变化为例分析不同处理对土壤剖面含盐量的影响(图3)。各处理的土壤含盐量随土层深度增加而增加。6月份开始夏季气温升高、蒸发强烈,导致盐分向表层土壤迁移,各处理表层土壤均有返盐现象;起垄处理的返盐强度低于未起垄处理。改良前该地区碱化盐土土壤盐分表聚特征明显,随着施用改良物料、灌水淋洗、农艺等措施的应用,土壤盐分逐渐在深层累积。在垂直剖面上,改良前0~20 cm土层土壤盐分占60 cm土体总盐分

的54.7%,20~60 cm土层土壤盐分占60 cm土体总盐分的45.3%,盐分呈“T”型分布,盐分表聚特征明显。通过施用改良物料、灌水淋洗,未起垄种植处理下0~20 cm土层土壤盐分占60 cm土体总盐分的25.7%,起垄沟植处理下0~20 cm土层土壤盐分占60 cm土体总盐分的21.2%,起垄沟植处理有利于降低垄沟内0~20 cm土层土壤盐分。相同灌溉定额条件下,0~40 cm土层起垄处理的土壤盐分比未起垄处理低15.7%,起垄有助于降低土壤盐分。起垄沟植方式下有助于将降水、灌溉水蓄积于垄沟内,压盐效果好于未起垄处理。

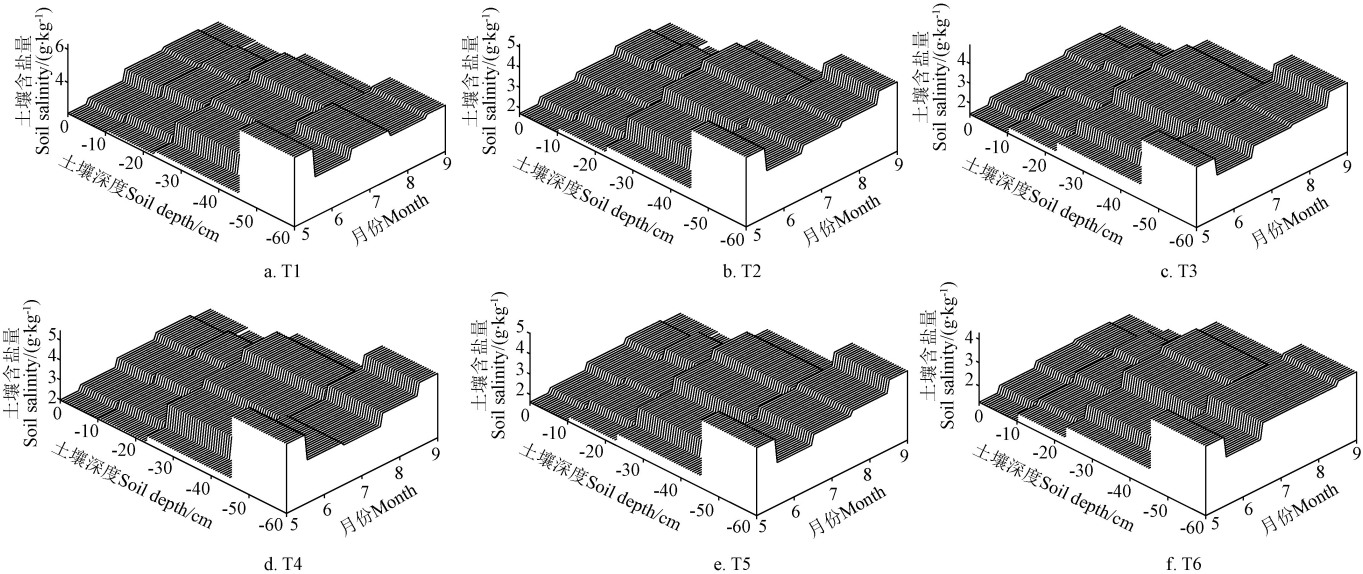


图3 2017年5~9月不同处理对0~60 cm土层剖面土壤含盐量的影响  
Fig.3 Effects of different treatments on salinity of 0-60 cm soil layers from May to September in 2017

2.5 不同处理对紫穗槐生长的影响

T6处理显著促进了紫穗槐基径、株高和冠幅指标的增长,T1处理的紫穗槐各项指标为6个处理中最低(表4)。T6处理与T5处理无显著性差异( $P>0.05$ )。第1年,在灌溉定额为8 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>条件下,起垄沟植处理紫穗槐的平均成活率分别比未起垄处理高5.6%、5.5%、6.8%,平均冠幅高

25.4%、29.4%、30.0%。第2年紫穗槐的基径、株高和冠幅指标均高于第1年,相应灌溉量下起垄沟植处理紫穗槐各项生长指标均高于未起垄处理,其中T6处理紫穗槐各项生长指标最高。结果表明:在相同灌溉定额条件下,起垄处理比未起垄处理更能促进紫穗槐生长发育;在起垄沟植或未起垄种植模式下高灌溉定额更有利于紫穗槐生长发育。

表4 不同处理对紫穗槐生长的影响  
Table 4 Effects of different treatments on growth of Amorpha

年份 Year	处理 Treatment	成活率 Survival rate/%	保存率 Preservation rate/%	基径 Base diameter/cm	株高 Height/cm	冠幅 Crown width/cm
第1年 First year	T1	85.7±2.94b	-	0.86±0.01b	92.8±15.4c	45.1±10.9b
	T2	86.9±1.70b	-	0.92±0.03ab	107.0±29.0b	49.0±2.8b
	T3	88.1±1.70b	-	0.95±0.02a	110.2±12.1b	51.4±10.8b
	T4	90.5±1.70a	-	0.92±0.04ab	108.5±16.9b	56.6±9.2ab
	T5	91.7±1.70a	-	0.98±0.04a	121.2±20.8a	63.4±10.9a
	T6	94.1±1.65a	-	1.01±0.05a	126.4±21.4a	66.8±12.0a
第2年 Second year	T1	-	76.2±1.70d	1.32±0.17b	114.5±13.6c	85.7±29.1c
	T2	-	77.4±1.70cd	1.41±0.21ab	119.5±12.8bc	98.6±19.8b
	T3	-	80.9±1.65c	1.42±0.19a	121.7±11.5b	102.5±20.1b
	T4	-	86.9±1.70b	1.38±0.24b	132.8±19.2b	108.6±21.1b
	T5	-	90.5±1.70a	1.47±0.18a	141.5±21.3a	117.5±24.0a
	T6	-	91.7±1.70a	1.51±0.15a	143.8±22.5a	122.7±38.6a

注:不同小写字母表示同一年份不同处理在0.05水平差异显著。  
Note: Different letters indicate significant difference among treatments in the same year at 0.05 level.

## 2.6 不同处理对碱化盐土改良效果的综合评价

以土壤容重、pH 值、碱化度、含盐量及紫穗槐生长指标为评价指标, 根据各指标与土壤改良效果的相关性, 采用不同函数式求隶属函数值, 进而对改良效果进行综合评价, 结果如表 5 所示。

表 5 不同处理改良碱化盐土效果综合评价指数及排序

Table 5 Comprehensive appraisal index and sorting of alkalinized solonchak improvement effect of different treatments

指标 Index	T1	T2	T3	T4	T5	T6
容重 Bulk density	0	0.36	0.47	0.19	0.47	1
pH 值 pH value	0	0.23	0.77	0.15	0.69	1
碱化度 Alkalinity	0	0.26	0.53	0.18	0.69	1
含盐量 Salinity	0	0.28	0.68	0.11	0.51	1
成活率 Survival rate	0	0.14	0.29	0.57	0.71	1
保存率 Preservation rate	0	0.08	0.30	0.69	0.92	1
基径 Base diameter	0	0.47	0.53	0.32	0.79	1
株高 Height	0	0.17	0.25	0.62	0.92	1
冠幅 Crown width	0	0.35	0.45	0.62	0.86	1
综合评价 Comprehensive evaluation	0	0.26	0.47	0.38	0.73	1
排序 Rank	6	5	3	4	2	1

注: 容重、pH 值、碱化度、含盐量与改良效果呈负相关, 成活率、保存率、基径、株高、冠幅与改良效果呈正相关。

Note: Bulk density, pH value, alkalinity and salinity are negatively correlated with effect of improvement. Survival rate, preservation rate, base diameter, height and crown width are positively correlated with effect of improvement.

由表 5 可知, 6 个处理中 T6 处理综合评价分最高, 排名第 1, 改良效果为所有处理中最好。根据综合评价由大到小的排序结果可知, 6 个处理改良碱化盐土的效果依次为: T6、T5、T3、T4、T2、T1; 相同种植方式条件下, 灌溉定额越高改良效果越好; 相同灌溉定额条件下, 起垄沟植的改良效果优于未起垄种植处理。

## 3 讨论

良好的土壤水盐环境可促进植物根系生长, 改善田间小气候, 抑制积盐, 促使盐碱土向良性演变。垄沟内种植能有效蓄积自然降水和灌溉水, 对水进行时空调控, 明显改善农田土壤水盐条件, 最大限度的集聚和利用水资源, 这在大量研究中得到证实<sup>[13,24]</sup>。起垄处理的土壤含水率高于未起垄处理, 是由于起垄改变了地表微形态, 可拦截部分径流、集纳降雨, 增加土壤蓄水利于水分向下运移, 垄沟内(种植区)水分产生叠加。有研究表明<sup>[25]</sup>: 随垄沟内土壤含水率增加, 垄下侧渗作用增强, 垄沟中水分垂直下渗作用增强, 有利于垄沟内植物根系的生长, 同时也有助于压盐。在相同降雨量条件下, 起垄沟播模式可使作物种植区产生集雨效应, 提高垄沟内土壤含水率, 促进种植区盐分淋洗, 减轻土壤盐分对作物根系的不良影响<sup>[13]</sup>。本试验结果表明: 相同灌溉定额条件下, 起垄处理的土壤盐分均低于未起垄处理, 0~40 cm 土层起垄处理的土壤盐分比未起垄处理低 15.7%。在本试验中, 垄沟内种植紫穗槐, 7、8 月份紫穗槐覆盖度逐渐增大, 能起到遮阴的效果致使垄沟内温度低于垄上温度, 垄沟内温度低, 能减少地表蒸发, 抑制蒸发返盐; 此外, 7、8 月份的降雨量占全年的 45%以上(图 1), 垄沟能

蓄积天然降水, 提高土壤含水率; 因此, 起垄沟植压盐效果明显, 有利于为紫穗槐正常生长发育提供适宜的水盐环境。本研究还发现, 高灌水量有利于土壤剖面 0~60 cm 土层盐分淋洗; 低灌水量灌溉后表层土壤盐分累积明显, 这是由于灌水量较小时, 蒸发量大会导致深层土壤盐分向地表迁移, 造成表层土壤可溶性盐增加<sup>[26]</sup>。

植物的生长与水、肥、光照、温度密切相关。大量研究表明: 与比未起垄种植相比, 起垄沟植更有利于植物生长发育<sup>[27]</sup>, 促进作物产量提高<sup>[13,28]</sup>。起垄改变了地表微形态, 形成垄沟相间的土壤微地形, 垄背形成集水面, 径流沿垄背坡面汇集到垄沟内形成水分叠加, 使水集流到苗木根部被充分吸收利用, 促进垄沟内植物根系的生长, 缓解植物生长面临的逆境胁迫<sup>[29]</sup>; 同时, 起垄沟植因改变地表微形态, 致使地表面积、受光面积、土壤与大气交界面均有所增加, 能协调土壤水、肥、气、热状况, 改善植物生长环境, 对植物的生长发育有促进作用<sup>[30]</sup>。本试验中起垄沟植改变了田间微型环境, 改善了紫穗槐的立地条件, 与未起垄处理相比更能促进紫穗槐生长发育。值得注意的是, 尽管在本试验条件下随灌溉定额增加土壤盐分呈降低趋势, 但灌溉定额为 9 750 和 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时, 起垄沟植紫穗槐的生长指标无显著差异, 且试验区地处干旱区, 水资源有限, 灌溉量过大会导致水分利用效率降低<sup>[31]</sup>, 与高效用水的原则相悖; 另外, 过量灌溉会引起深层渗漏, 抬高地下水位增加发生次生盐渍化的风险<sup>[32]</sup>。

## 4 结论

统一施用脱硫石膏配合淋洗措施能显著降低原土的 pH 值、碱化度和含盐量; 起垄沟植方式下垄沟内可汇集灌溉水和降水等水资源, 提高土壤含水率; 0~40 cm 土层起垄处理的土壤盐分比未起垄处理低 15.7%, 起垄沟植可实现蓄水控盐, 紫穗槐的成活率、株高、冠幅均高于未起垄处理。灌溉定额为 9 750 和 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 时, 紫穗槐生长指标无显著差异, 且试验区地处干旱区, 水资源有限, 灌水量过多不仅浪费水资源还会增加发生次生盐渍化的风险。因此, 施用脱硫石膏并起垄沟植紫穗槐、灌溉定额为 9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 适宜于甘肃靖远碱化盐土的改良种植。

### [参 考 文 献]

- [1] Kim Y J, Choo B K, Cho J Y. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: Ten years of long-term experiments[J]. Catena, 2017, 156: 131—138.
- [2] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015(4): 125—130.  
Yang Zhen, Wang Baoshan. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015(4): 125—130. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郭世乾, 崔增团, 傅亲民. 甘肃省盐碱地现状及治理思路与建议[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(4): 75—79.  
Guo Shiqian, Cui Zenguan, Fu Qinmin. Idea and suggestions

- on saline-alkali soil status quo and managements in Gansu province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(4): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙兆军. 中国北方典型盐碱地生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [5] 杜明新. 不同株龄紫穗槐根系分布特征与空间异质性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
Du Mingxin. Doot Structure Characteristics and Spatial Heterogeneity of Different-plant-age of *Amorpha*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 706—712.  
Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 706—712. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张建锋, 宋玉民, 邢尚军, 等. 盐碱地改良利用与造林技术[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 124—129.  
Zhang Jianfeng, Song Yumin, Xing Shangjun, et al. Saline soil amelioration and forestation techniques[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(6): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张婷, 吴普特, 赵西宁, 等. 垄沟灌溉种植对玉米光合特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 96—98.  
Zhang Ting, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Effects of ridge and furrow irrigation planting on photosynthetic characteristics and yield of corn[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 96—98. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张婷, 吴普特, 赵西宁, 等. 垄沟种植模式对玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 27—30.  
Zhang Ting, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Effects of ridge and furrow planting system on growth and yield of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵沛义, 贾有余, 妥德宝, 等. 阴山北麓旱作区垄沟集雨种植增产机理研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 165—170.  
Zhao Peiyi, Jia Youyu, Tuo Debao, et al. Study on the mechanism of yield increasing of furrow planting on rain-fed field in north foot of Yinshan Mountain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12): 165—170. (in Chinese with English abstract)
- [11] Dai Y, Senge M, Ito K, et al. Experimental evaluation of irrigation methods for soil desalinization[J]. Paddy & Water Environment, 2015, 13(2): 159—165.
- [12] 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 Yifu, Li Hongwen, Hu Hong, et al. Punching and filling sand method increasing water infiltration and desalting rate of saline-alkali soil under flooding irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(6): 76—83. (in Chinese with English abstract)
- [13] 樊丽琴, 李磊, 吴霞. 不同油葵种植方式对银北灌区盐碱地土壤温度、含水率和电导率的影响[J]. 作物杂志, 2019, 192(5): 1—7.  
Fan Liqin, Li Lei, Wu Xia. Effects of different planting patterns for oil sunflower on saline-alkali soil temperature, moisture and electrical conductivity in Yinbei Irrigation District[J]. Crops, 2019, 192(5): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王遵亲, 祝寿全. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] 肖国举, 秦萍, 罗成科, 等. 犁翻与旋耕施用脱硫石膏对改良碱化土壤的效果研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 433—437.  
Xiao Guojun, Qin Ping, Luo Chengke, et al. Study on effects of plowing and rotary tillage on improved solonchic soil with desulfurized gypsum[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 433—437. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨军, 孙兆军, 刘吉利, 等. 脱硫石膏糠醛渣对新垦龟裂碱土的改良洗盐效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 128—135.  
Yang Jun, Sun Zhaojun, Liu Jili, et al. Effects of saline improvement and leaching of desulfurized gypsum combined with furfural residue in newly reclaimed farmland crack alkaline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 128—135. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东. 基于土壤饱和入渗理论计算盐碱地冲洗定额[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 563—567.  
Hu Shunjun, Tian Changyan, Song Yudong. Calculation of salinity leaching quota based on saturated infiltration theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 563—567. (in Chinese with English abstract)
- [18] 穆永光, 穆春生. 紫穗槐在松嫩草原盐碱地区的引种试验[J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 79—81.  
Mu Yongguang, Mu Chunsheng. Introduction of *Amorpha fruticosa* L. in the saline-alkali soil of Songnen grassland[J]. Journal of Jinlin Normal University: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 79—81. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张蕾娜, 冯永军, 王兆锋. 新型土地复垦基质配比试验及盐分冲洗定额研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 268—272.  
Zhang Leina, Feng Yongjun, Wang Zhao Feng. A kind of mixed media composed of fly ash and acid residue of furfural for land reclamation and its leaching requirement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(4): 268—272. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨军, 孙兆军, 罗成科, 等. 水盐调控措施改良龟裂碱土提高油葵产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 121—128.  
Yang Jun, Sun Zhaojun, Luo Chengke, et al. Effect of salt-water regulation on improving takyric solonchik land and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 121—128. (in Chinese with English abstract)
- [21] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [22] 王旭, 孙兆军, 韩磊, 等. 砾石暗沟提高脱硫石膏改良龟裂碱土效果及油葵产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 143—151.  
Wang Xu, Sun Zhaojun, Han Lei, et al. Subsurface gravel blind ditch increasing improved effects of takyric solonchik by desulfurized gypsum and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(22): 143—151. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王学全, 高前兆, 卢琦, 等. 内蒙古河套灌区水盐平衡与干排水脱盐分析[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 455—460.  
Wang Xuequan, Gao Qianzhao, Lu Qi, et al. Salt-water balance and dry drainage desalting in Hetao irrigating area, Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 455—460. (in Chinese with English abstract)
- [24] 韩娟. 沟垄集雨种植条件下农田土壤水温与产量效应的DNDC模型模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.



- Han Juan. Modeling Impacts of Rainfall Harvesting with Ridge and Furrow on Soil Temperature and Moisture and Yield with DNDC[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [25] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 等. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 113—123.
- Gu Xiaobo, Li Yuannong, Huang Peng, et al. Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 113—123. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王子煜. 夏玉米田间沟垄立体种植群体的调控研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- Wang Ziyi. Summer Corn Field Research of Furrow and Ridge Combinations with Group Control[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [27] Tabuada M A, Rego Z J C, Vachaud G, et al. Modelling of furrow irrigation: Advance with two-dimensional infiltration[J]. Agricultural Water Management, 1995, 28(3): 201—221.
- [28] 李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 等. 施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 212—220.
- Li Tingliang, Xie Yinghe, Ren Miaomiao, et al. Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 212—220. (in Chinese with English abstract)
- [29] 何峰, 王堃, 李向林, 等. 垄沟集雨对干旱半干旱区土壤水热条件及老芒麦产草量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 122—126.
- He Feng, Wang Kun, Li Xianglin, et al. Effects of ridge and furrow rainfall harvesting system of on soil hydrothermal condition and yields of *Elymus sibiricus* L. in arid and semiarid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 122—126. (in Chinese with English abstract)
- [30] 高传昌, 赵楠, 汪顺生. 小麦、玉米一体化垄作沟灌技术要素试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 23—25.
- Gao Chuanchang, Zhao Nan, Wang Shunsheng. Ridge culture and furrow irrigation technical elements of wheat and corn integration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2): 23—25. (in Chinese with English abstract)
- [31] Cantore V, Lechkar O, Karabulut E, et al. Combined effect of deficit irrigation and strobilurin application on yield, fruit quality and water use efficiency of “cherry” tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 53—61.
- [32] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 26—31.
- Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 26—31. (in Chinese with English abstract)

## Effects of planting patterns and irrigation quotas on alkalized solonchak and growth of amorpha

Wang Xu<sup>1</sup>, Fan Liqin<sup>1</sup>, Li Lei<sup>1</sup>, Sun Zhaojun<sup>2,3\*</sup>, Sameh El-Sway<sup>4</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia (China-Arab) Key Laboratory of Resources Assessment and Environmental Regulation in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 4. Vegetable Research Department, Agricultural and Biological Division, National Research Centre, Giza 12311, Egypt)

**Abstract:** Saline-alkali soil is a general name referring to saline soil, alkaline earth salt and other saline and solonchak soils. Accumulation of soluble salts in the proximity of the surface of saline-alkali soil could result in salt stress impeding crop growth as a result. Soil salinity is a limiting factor in agricultural production and an environment concern not only in China but worldwide. Gansu province in China has a type of alkalized solonchak, a special saline soil characterized by high salt content and poor soil structure which combined to impend crop growth. The purpose of this paper is to experimentally investigate the impact of planting patterns and irrigation amounts on soil salinity and plant growth in the alkalized solonchak. The experiment was conducted at Jingyuan in Gansu province (37°02' N, 104°96' E) using amorphia (*Amorpha fruticosa* L.) grown in the alkalized solonchak as the model plant. Prior to the experiment, desulfurized gypsum was applied to the soil at 18 t/hm<sup>2</sup>. We compared two planting pattern: furrow planting and non-furrow planting, and three irrigation amounts: 8 250, 9 750, 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, each treatment having three replicates. The results show that: 1) All treatments significantly reduced soil pH, alkalinity and salt content, and there was no significant difference in pH and alkalinity between the treatments. Salt content in top 0-40 cm soil under furrow planting decreased by 15.7% compared to that under non-furrow planting. 2) Under furrow planting, the irrigation and precipitation accumulated in the furrow ditch, thereby improving soil moisture and reducing soil salinity, compared that under non-furrow planting. Furrow planning improved survival rate, preservation rate, height, base diameter and crown width of the amorphia, compared to non-furrow planting. 3) There was no significant difference in growth index of the amorphia between the irrigation 9 750 and 11 250 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, indicting excessive irrigation not only wasted water but also increased the risk of secondary salinization. Using raised-bed cultivation with the amorphia planted in the furrow, along with applying 18 t/hm<sup>2</sup> of desulfurized gypsum and irrigating 9 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> of water was most suitable for improving plant growth in the alkalized solonchak in Gansu province. The results have wide application for developing sustainable agriculture in the alkalized solonchak in Gansu and other regions.

**Keywords:** irrigation; leaching; soil salinity; planting pattern; alkalized solonchak