

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.377>



# 基于碎石屏障的土壤盐渍化改良技术及机理研究

陶彦臻<sup>1</sup>, 苏春利<sup>1\*</sup>, 谢先军<sup>1</sup>, 曾邯斌<sup>1</sup>, 潘洪捷<sup>2</sup>, 闫福贵<sup>2</sup>

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020

**摘要:** 利用碎石屏障阻断非饱和带毛细上升为土壤盐渍化改良提供了新思路。为了研究碎石屏障对盐渍化土壤改良的可行性以及碎石层结构和埋深对改良效果的影响, 在河套灌区西部杭锦后旗典型盐渍化分布区建立试验地, 设置了 7 组不同碎石屏障处理工艺开展土壤盐渍化改良试验, 对试验地 40 cm 深度的土壤盐分、pH、阳离子交换量、交换性钠百分率等参数进行了为期一年的监测和分析。结果表明, 7 组不同处理中, 埋设深度为 60~80 cm, 利用颗粒直径为 1 cm 和 3 cm 的碎石按上细下粗的结构分两层铺设的处理方法改良效果最佳; 从表层到 40 cm 深, 土壤 EC 值平均下降 55.9%。较大的碎石屏障埋深, 上细下粗的铺设方式, 可提高下层碎石孔隙度, 并在非饱和带深处切断毛细管, 从而有效降低土壤毛细上升高度, 抑制深层土壤中的盐分上移“返盐”, 改良效果较好。

**关键词:** 土壤盐分; 碎石屏障; 物理改良; 毛细作用; 河套灌区; 生态学。

中图分类号: P95

文章编号: 1000-2383(2021)11-4118-09

收稿日期: 2020-12-17

## Technology and Mechanism of Soil Salinization Using Gravel Barrier

Tao Yanzhen<sup>1</sup>, Su Chunli<sup>1\*</sup>, Xie Xianjun<sup>1</sup>, Zeng Hanbin<sup>1</sup>, Pan Hongjie<sup>2</sup>, Yan Fugui<sup>2</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. Geological Survey Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China

**Abstract:** The use of gravel barrier to block capillary action provides a new idea for soil salinization improvement. In order to demonstrate the feasibility of soil salinization improvement using gravel, a test site was established in the typical salinization distribution area of Hangjin Rear Banner in the west of Hetao irrigation area. Different structures and buried depths of gravel layers were explored to identify the improvement effect of soil salinization. Soil salinity, pH, cation exchange capacity (CEC) and the percentage of sodium exchange were monitored for one year. The results show that among the 7 groups of different treatments, the treatment with buried depth of 60–80 cm and particle diameter of 1 cm and 3 cm was the best condition. The average soil EC value of at the four depths from the surface to 40 cm decreased by 55.9%. The gravel barrier buried deeply and laid down in a fine-grained and coarse manner, which have higher porosity in the bottom layer of the gravel barrier, can cut off the capillary at the deeper depth of unsaturated zone. Therefore, it can decrease effectively the rising height of soil capillary, and inhibit the salt in the deep soils from upward, namely “salt return”.

**Key words:** soil salinity; gravel barrier; physical improvement; capillary effect; Hetao irrigation area; ecology.

基金项目: 内蒙古自治区河套灌区盐碱地生物修复与综合开发研究项目(No.2019046338)。

作者简介: 陶彦臻(1997-), 男, 在读硕士生, 主要研究方向为水文地球化学与生态环境。ORCID: 0000-0001-9313-7791。E-mail: 1150148580@qq.com

\* 通讯作者: 苏春利, E-mail: chl.su@cug.edu.cn

引用格式: 陶彦臻, 苏春利, 谢先军, 等, 2021. 基于碎石屏障的土壤盐渍化改良技术及机理研究. 地球科学, 46(11):4118–4126.

## 0 引言

土壤盐渍化易引发植被生理干旱,影响作物对养分的吸收,并且使土壤板结,降低阳离子交换量.过量的盐分还会直接抑制土壤微生物的活动.我国盐渍化的土壤近 760 万  $\text{hm}^2$ ,主要分布在西北、华北、东北及沿海地区,约占耕地面积的 1/5(张宇晨等,2019).河套灌区作为国家重点商品粮基地、内蒙古自治区西部最大的粮仓,素有“塞上江南”、“塞上粮仓”的美誉.但由于该地区地下水位浅,降水量少,蒸发高,母质含盐量高,且长期漫灌,排水工程滞后,土壤盐碱化日趋加重,严重影响农业综合效益提升、农业结构调整和畜牧业发展,已成为制约农牧民增产增收及农牧业综合生产能力提升的主要瓶颈.

随着我国各种改良技术的不断发展,盐渍化土壤改良措施取得新的进步.但是,盐碱地改良技术的发展是一个循序渐进的过程.不同地域的盐碱土适宜的改良措施不同,不同的改良方法各有优缺点(Zhao *et al.*, 2020a, 2020b; 韦本辉等, 2020).化学改良在降低土壤盐度碱度,改善土壤理化性质的同时,可能给土壤带来二次污染(付力成等, 2020);生物改良具有投资少、无污染、可持续性强等特点,但见效较慢(王凡和屈忠义, 2018; Zhang *et al.*, 2020).现有的物理改良见效快,但成本高,难以持续(Zhao *et al.*, 2020a).从客土回填到暗管排盐技术的研发,再到暗管、原土改良技术集成应用,盐碱地物理改良技术已相对较为成熟(刘云和孙书洪, 2014; 殷厚民等, 2017),但经济成本过高,一直是很多地区盐碱地改良的一大障碍,难以大面积推广,经济高效的盐碱地物理改良技术仍是亟待解决的问题.

采用低成本的建筑尾料碎石,在土壤层深处铺设碎石屏障进行土壤盐渍化改良是一个新思路.本研究拟结合河套灌区土壤盐渍化特征,在河套灌区西部杭锦后旗建立试验地,通过对 7 个不同铺设工艺的碎石屏障实验小区改良效果监测,探索利用碎石屏障实现经济高效改良盐碱地的可行性,为内陆干旱农业灌区农村经济持续健康发展、生态环境保护提供技术支撑.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本研究选择巴彦淖尔市杭锦后旗典型土壤盐渍化分布区建立试验场,开展物理改良试验研究.该地区处河套平原腹地,属于温带大陆性干旱、半干旱气候,夏短冬长,冬冷夏热,降雨量稀少,蒸发强烈,春季干燥多风,光照时间充足,日温差大.年均降水量为 177 mm,年均蒸发量 2 000 mm 以上.降水量在时间上分布不均匀,70% 以上的降水量集中分布于 7、8、9 月份.

试验地位于蛮会镇杨四圪旦村(原红旗公社永丰村七组)( $107^{\circ}11'46.233^{\circ}\text{E}$ ,  $40^{\circ}59'56.5836^{\circ}\text{N}$ ).该区土壤母质含盐量及地下水总溶解固体量都很高,是土壤盐化的主要因素.试验地土壤容重为  $1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,地表以下 40 cm 深度内土壤砂粒含量在 50% 以上,40~100 cm 深度黏土含量较高,土壤孔隙度比 0~40 cm 层位小.土壤可溶盐类型主要为  $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}$  型,表层 0~20 cm 的土壤含盐量为  $8.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,属重度盐渍化土壤.区域地下水位不同季节变幅较大,地下水埋深为 1.0~2.2 m, TDS 变化范围为  $5.357\sim 7.806 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 为 9.11(曾邯斌等, 2021).

### 1.2 试验方案设计

采用碎石毛细屏障层修复技术对盐碱地进行改良修复.屏障层材料为当地采石场建筑材料用碎石的尾料,主要成分为  $\text{SiO}_2$ .毛细屏障结构包括 3 层,由上到下依次为隔离层、碎石屏障层、隔离层.隔离层使用土工布材料.土工布强力高、耐腐蚀、透水性好,主要用来防止碎石屏障层上部和下部土壤中粒径较细的砂粒、粘粒进入碎石屏障层中的孔隙,从而造成屏障层失效.

试验的主要处理工艺包括不同粒径的碎石层组合和不同结构,第 1 种采用粒径为 0.1~3 cm 未分选的碎石铺设,含有较高比例的细砂;第 2 种采用筛分后粒径为 1 cm 和 3 cm 的碎石子铺设,分为上下 2 层,细粒在上层,粗粒在下层,各 10 cm 厚;第 3 种采用粒径为 1~3 cm 未分选的粒度较粗的碎石.次处理为碎石层埋设深度不同,具体试验设计如表 1 所示.试验共 7 种处理,每种处理工艺设 2 个重复,每个小区面积为  $4 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m}\times 2 \text{ m}$ ),共  $56 \text{ m}^2$ .其中,1 号组为对照组,不铺设任何材料,试验小区布置如图 1 所示.

试验小区于 2019 年 7 月施工完成.根据试验设

表 1 不同碎石屏障工艺设计  
Table 1 Process design of different gravel barriers

处理编号	埋设深度 (cm)	厚度 (cm)	粒径和结构
G1(CK)	-	-	-
G2	40~60	20	0.1~3 cm, 未分选
G3	60~80	20	0.1~3 cm, 未分选
G4	40~60	20	1 cm 和 3 cm, 上细下粗
G5	60~80	20	1 cm 和 3 cm, 上细下粗
G6	40~60	20	1~3 cm, 未分选
G7	60~80	20	1~3 cm, 未分选

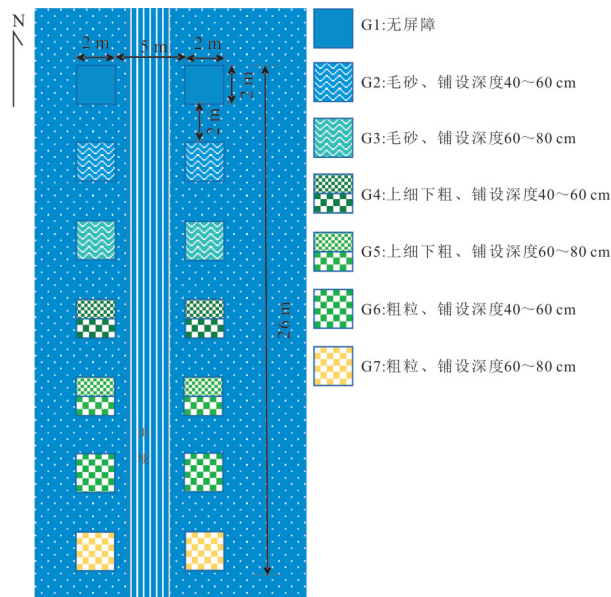


图 1 试验小区平面布置图  
Fig.1 Layout of test area

计,先利用铲车将土壤按 20 cm 厚度分层挖出后分别堆放,直至碎石屏障埋设深度.然后,严格按照设计铺设碎石屏障层,铺设完成后,将挖掘出的土壤再分层回填于碎石屏障上,适当压实,恢复原状.土地平整后,浅耕 10 cm,撒上苜蓿、稷子草种子,覆土,播种后适当滴灌.

### 1.3 样品采集与分析

**1.3.1 土壤采集与处理** 试验小区建设于 2019 年 7 月初,土壤样品分别于土壤层稳定一个月后 2019 年 7 月下旬和修复一年后 2020 年 7 月下旬采集.用土钻对各试验小区分层取样,取样深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm.使用 S 型取样法,每个小区取 5 个点,分层混合均匀,在阴凉条件下自然风干,研磨、过筛后用于测定相关指标(Zhou *et al.*, 2019;肖玉娜等,2020).

**1.3.2 指标测定** 将通过 2 mm 筛孔的风干土样按照 1:5 的土水比浸出,使用雷磁 DZB-712 便携式多参数分析仪测定土壤浸提液 pH、EC,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ ,用离子色谱仪测定  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,使用中和滴定法测定  $\text{HCO}_3^-$ .土壤阳离子交换量(CEC)用乙酸钙交换法测定;用醋酸铵提取可交换性钠,测定其浓度,根据公式计算交换性钠百分比(ESP)(Luo *et al.*, 2017;Xie *et al.*, 2019).

## 2 结果与分析

### 2.1 不同碎石屏障工艺对土壤盐分的影响

相对于对照组,碎石屏障施用 1 年后,所有处理工艺均表现出明显的降盐效果(图 2).在 0~10 cm 深度,各处理组与对照组差异显著.与对照组相比,EC 值分别下降 12.85%、66.50%、58.72%、77.44%、26.09% 和 60.12%;与 1 年前初始值相比,G1~G7 的 EC 值分别下降 28.58%、17.57%、56.77%、58.24%、65.40%、31.94% 和 44.24%,除 G2 组,其余各处理降幅均大于对照组,说明碎石屏障在 0~10 cm 深度土层具有良好的修复效果.相较于其他深度,在 0~10 cm 处,对照组同 1 年前相比有明显下降,主要是因为经过 1 年的春灌、秋灌,表层盐分随水分下移,返盐不明显.在 10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 深度,碎石屏障施用 1 年后,各处理与对照组差异显著;G1、G2 组与 1 年前初始值相比差异不显著,其余各处理与 1 年前相比差异显著,表现出较为明显的降盐效果,说明碎石屏障对于降低土壤盐渍化有显著的效果.

可以看出,在其他条件相同的情况下,埋设深度为 60~80 cm 的处理组普遍比埋设深度为 40~60 cm 的处理组年间 EC 值降幅更大,降盐效果更好;而在埋设深度相同的情况下,碎石屏障工艺为 1 cm 和 3 cm 上细下粗结构组成的处理组年间 EC 值降幅要大于另外两种碎石屏障工艺的处理组,降盐效果更佳.其中 G5 组在各个深度上 EC 值最低,在 0~10 cm 深度,其 EC 值与其他处理差异显著,修复效果最优.这主要是因为碎石屏障的孔隙度大,毛细力减小,抑制了地下水的毛细上升,从而抑制盐分随水分向地表迁移,形成了“隔盐层”.G5 采用上细下粗的碎石结构,利用粒径为 1 cm 和 3 cm 的碎石分两层铺设,每层厚 10 cm,顶部、底部和中间分别用土工布分隔.上细下粗的碎石屏障,结构稳定,分

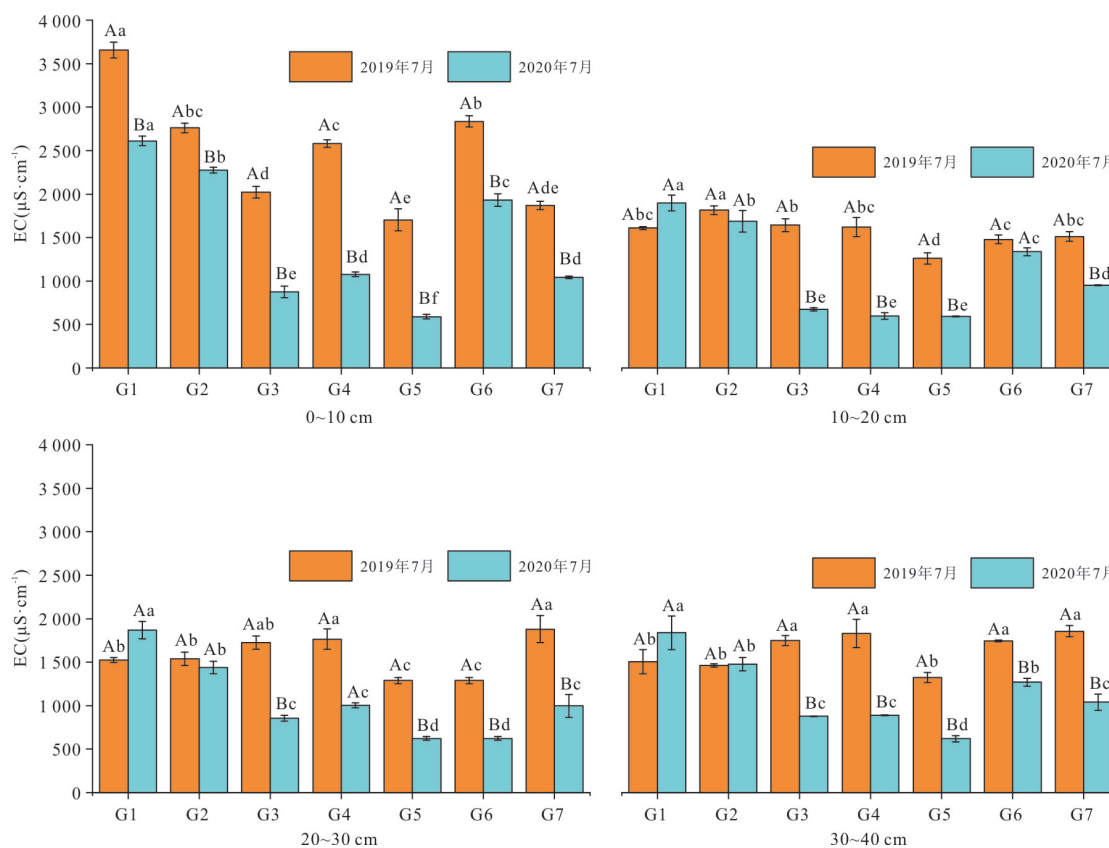


图2 不同碎石屏障处理对土壤EC值的影响

Fig.2 Effect of different gravel barrier treatments on soil EC value

使用单因素方差分析,不同小写字母表示不同处理在  $P < 0.05$  水平差异显著;不同大写字母表示处理2年之间在  $P < 0.05$  水平差异显著;下同

选良好,孔隙度大,可以有效阻断毛细作用,降低毛细高度,抑制盐分随着蒸发作用向上迁移。

## 2.2 不同碎石屏障工艺对土壤碱性的影响

在碎石屏障实施1年后,各组土壤pH均有降低(图3)。在0~10 cm深度,除第G2、G6、G7组稍有下降之外,其余各组处理与对照组土壤pH相比,pH明显降低;除G2、G7组,其余各组与1年前初始值相比差异显著。G3、G4、G5组处理的土壤pH相对于对照组土壤pH分别下降4.25%、2.48%、5.41%,G1~G7组与1年前土壤pH初始值相比分别下降2.74%、0.33%、3.99%、3.23%、5.36%、1.04%、1.60%。虽然各处理土壤pH与1年前相比均有下降,但G2、G6、G7组处理土壤pH下降幅度小于对照组,说明G3、G4、G5组碎石屏障处理在0~10 cm深度有更好的降碱改土作用。在10~20 cm、20~30 cm深度土层,除G2、G6、G7组之外,其余各组处理与对照组土壤pH相比差异显著。在10~20 cm深度,除G1、G2、G7组外,其余各组与1年前初始值相比差异显著;20~30 cm深度,除G2组,其余各组均与1年前初始值相比差异显

著。在30~40 cm深度土层,G2、G6、G7组pH降幅较小,与对照组差异不显著。整体而言,在0~40 cm深度,G3、G4、G5组土壤pH下降较为明显,这3组的碎石屏障处理具有较好的降碱改土作用。

交换性钠百分比(ESP)是土壤胶体中交换性钠占阳离子交换总量的百分数,又称碱化度,可反映土壤碱化的程度(唐泽军等,2007)。实施碎石屏障处理后,土壤ESP的变化如表2、图4所示。碎石屏障施用1年后,在各个深度,各处理土壤ESP与对照组相比差异显著。同时,除对照组外,其余各组与1年前初始值相比差异显著,降幅明显。0~10 cm深度土壤,G2~G7组相对于对照组分别下降33.83%、48.70%、67.47%、69.15%、48.19%、60.36%;G1~G7组相对于1年前初始值分别下降4.38%、26.93%、38.37%、72.49%、63.08%、38.78%、52.78%。在10~20 cm深度,G2~G7组土壤ESP相较于对照组分别下降27.16%、43.96%、51.67%、68.35%、44.22%、58.79%;G1~G7组土壤ESP相对于1年前初始值分别下降2.68%、33.32%、40.93%、48.10%、62.79%、41.24%、



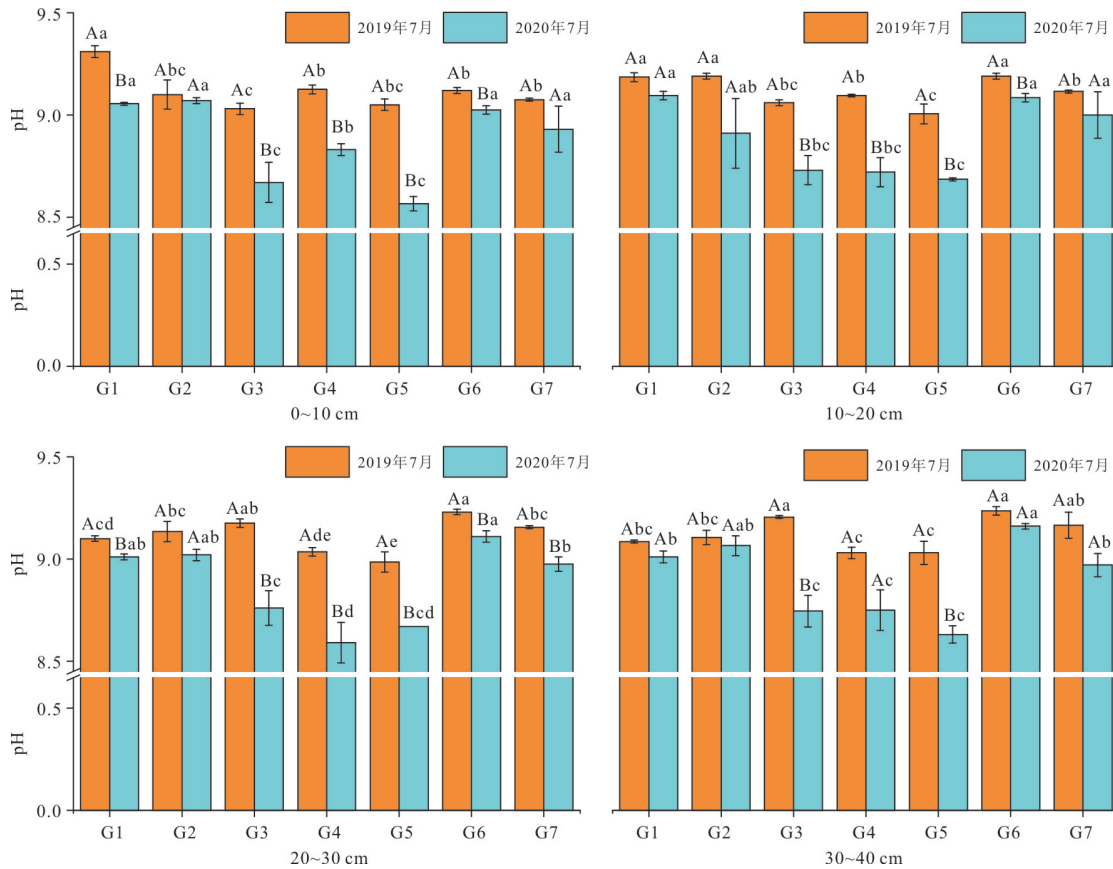


图3 不同碎石屏障处理对土壤pH的影响

Fig.3 Effects of different gravel barriers on soil pH

表2 不同碎石屏障处理对土壤ESP的影响

Table 2 Effects of different gravel barriers on soil ESP

处理	ESP(%)		ESP(%)		ESP(%)		ESP(%)	
	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm		30~40 cm	
	2019年	2020年	2019年	2020年	2019年	2020年	2019年	2020年
G1	30.07±0.32Aa	28.75±0.18Ba	26.81±0.31Ab	26.09±0.25Aa	25.06±0.25Ab	24.78±0.30Aa	25.81±0.60Ab	24.21±0.30Aa
G2	26.04±0.51Ab	19.03±0.17Bb	28.50±0.38Aa	19.00±0.16Bb	26.02±0.58Aab	18.16±0.06Bb	25.81±0.16Ab	20.23±0.11Bb
G3	23.93±0.27Ac	14.75±0.07Bc	24.76±0.20Ac	14.62±0.11Bc	26.28±0.56Aa	14.69±0.06Bd	28.17±0.59Aa	16.64±0.16Bc
G4	26.09±0.08Ab	9.35±0.13Be	24.30±0.15Acd	12.61±0.06Bd	23.79±0.12Ac	10.34±0.12Bf	24.21±0.17Ad	14.35±0.11Bd
G5	24.02±0.25Ac	8.87±0.07Bf	22.19±0.29Ae	8.26±0.002Bf	22.19±0.44Ad	8.57±0.01Bg	22.89±0.23Ae	10.98±0.03Bf
G6	24.33±0.01Ac	14.90±0.16Bc	24.77±0.53Ac	14.55±0.10Bc	26.23±0.36Aa	15.51±0.11Bc	25.43±0.50Abc	16.89±0.05Bc
G7	24.14±0.12Ac	11.40±0.12Bd	23.85±0.46Ad	10.75±0.09Be	26.55±0.60Aa	11.02±0.09Be	24.55±0.15Acd	11.97±0.04Be

注:表中数据形式为平均值±标准差; 同列不同小写字母表示不同处理在  $P < 0.05$  水平差异显著; 不同大写字母表示处理2年之间在  $P < 0.05$  水平差异显著。

54.91%。在 20~30 cm 深度, G2~G7 组土壤 ESP 相对于对照组分别下降 26.71%、40.71%、58.29%、65.43%、37.42%、55.54%; G1~G7 组土壤 ESP 相对于 1 年前初始值分别下降 1.11%、30.19%、44.08%、56.57%、61.39%、40.89%、58.51%。在 30~40 cm 深度, G2~G7 组土壤 ESP 相对于对照组分别下降

16.43%、31.27%、40.72%、54.64%、30.24%、50.54%; G1~G7 组土壤 ESP 相对于 1 年前初始值分别下降 6.20%、21.62%、40.93%、40.72%、52.03%、33.58%、51.23%。总体而言, 经过 1 年的试验, 各处理 ESP 下降幅度要大于对照组, 说明碎石屏障具有良好的降碱效果, 其中 G5、G7 组碱化度下降最为明显。

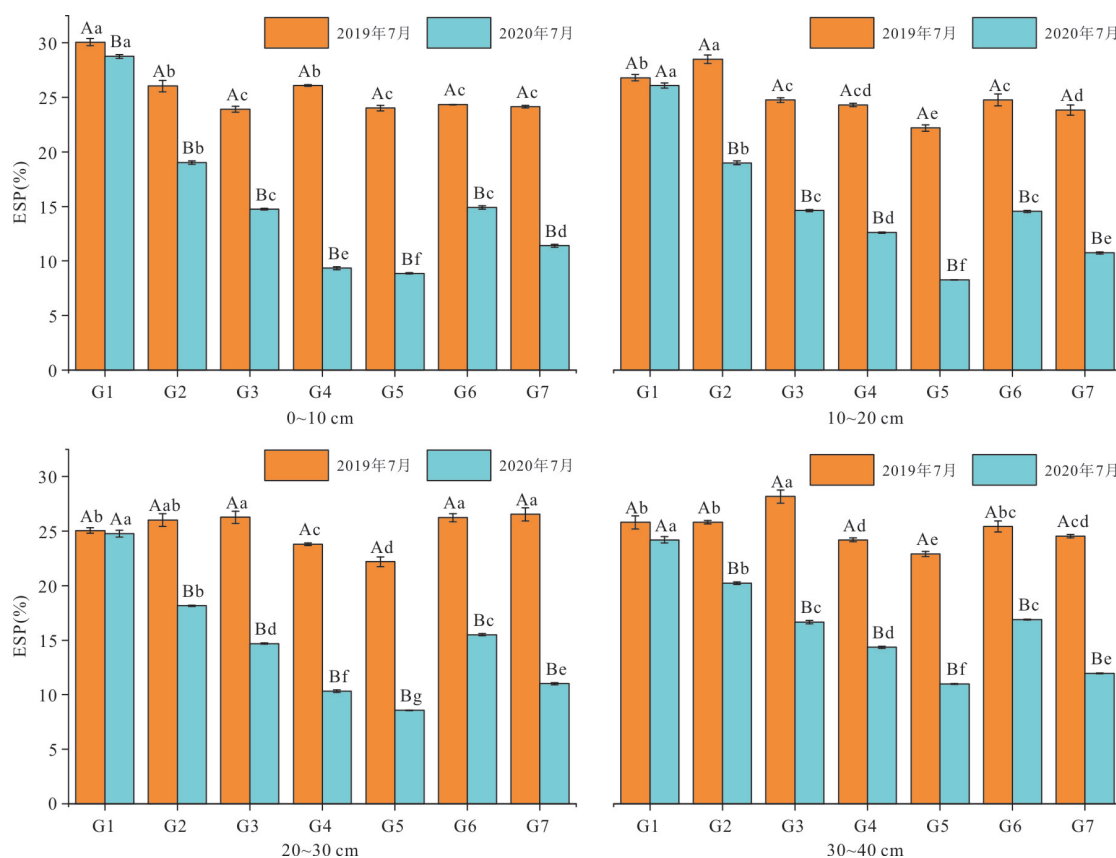


图4 不同碎石屏障处理对土壤ESP的影响

Fig.4 Effects of different gravel barriers on soil ESP

钠吸附比(SAR)是指土壤溶液中 $\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度平均值的平方根比值,主要表示 $\text{Na}^+$ 和土壤交换反应的相对活性,反映碱危害的程度.施用碎石屏障后,土壤SAR的变化如图5所示.施用碎石屏障1年后,除对照组外,各处理SAR在各个深度均有显著下降,对照组SAR在0~10 cm深度下降,在10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm深度上升.整体而言,各处理SAR的变化显示出碎石屏障具有良好的降碱效果,G5组效果最为显著.

碎石屏障的填埋过程中,打乱了土壤原本的毛细通道,增大了土壤孔隙度,有利于灌溉、降雨时土壤盐分的淋洗,有利于可溶性盐基离子向下运移. $\text{Na}^+$ 随水分下移有效降低土壤ESP, $\text{HCO}_3^-$ 的下移有效降低土壤pH.

### 2.3 碎石屏障土壤盐渍化改良机理

地下水位以上的非饱和带以空气和水共存为特征,非饱和带水盐运移行为受蒸发力和毛细力的控制.盐碱地土壤毛细水上升作用是水、盐、力等因素综合作用的结果(徐恒力等,2000),毛细水上升作用与表层土壤盐渍化程度密切相关(周欣等,2012).盐

渍化土壤有较强的吸水性,土壤中的盐分遇水溶解,导致土壤变软,蒸发失水后干缩板结,土壤结构遭到破坏.土壤孔隙度减小,毛细作用更加强烈,盐随毛细水上升,同时由于蒸发作用,毛细水中的盐析出,进一步加重土壤盐渍化(Zangiabadi *et al.*, 2020).

毛细水的上升高度与土壤的粒径密切相关.毛细上升的最大高度,如公式(1)所示(何艳平,2020).

$$H = 2T \cos \theta / \rho g r, \quad (1)$$

式中: $T$ 为液体表面张力,单位为N; $\theta$ 为弯液面与毛管之间的夹角,单位为 $^\circ$ ; $\rho$ 为液体的密度,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $g$ 是重力加速度,单位为 $\text{m}/\text{s}^2$ ; $r$ 为毛细管半径,单位为m.

由公式(1)可知,毛细上升高度与毛细管半径成反比,土壤毛细作用中的毛细管径与土壤孔隙度正相关,即土壤粒径越小,孔隙度越小,毛细上升高度越大,毛细作用越强烈(Hulin and Mercury, 2019; Mitra and van Duijn, 2019).碎石屏障层的孔隙度大于土壤的孔隙度,毛细作用受到抑制,形成了一段毛细阻隔层,有效抑制了盐分随水分上升到土壤表层.同时,由于毛细水上升是表层土壤水分

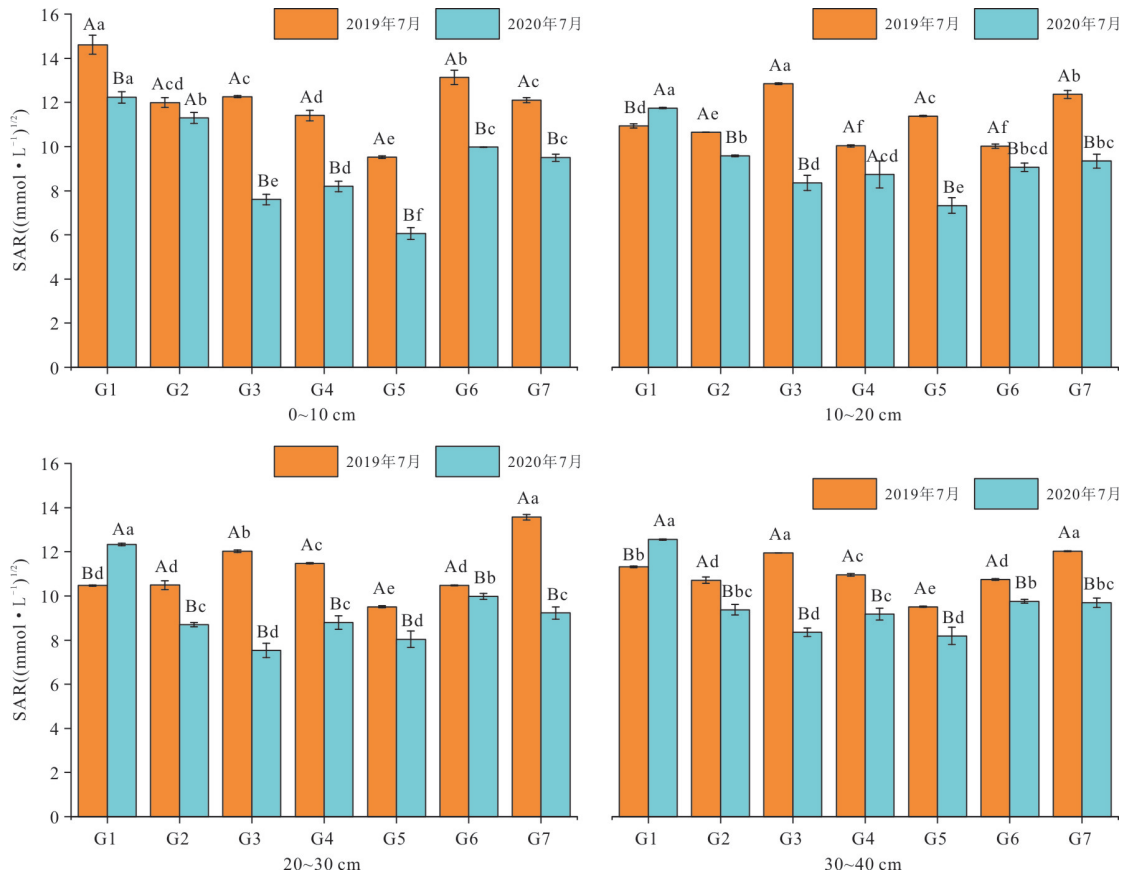


图 5 不同碎石屏障处理对土壤 SAR 的影响

Fig. 5 Effects of different gravel barriers on soil SAR

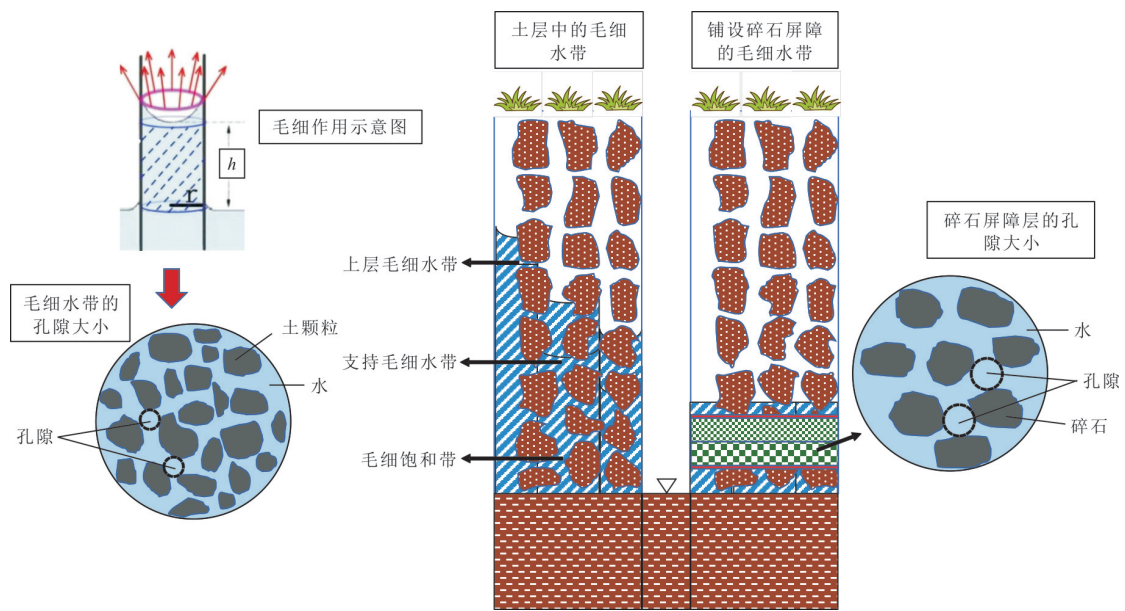


图 6 碎石屏障阻隔毛细作用机理示意

Fig. 6 Schematic diagram of capillary action mechanism of gravel barrier

的重要来源,上升到表层的毛细水量降低,表层土体结构较为稳定.

在本试验中,碎石屏障可有效改良盐碱地,这主要是因为碎石屏障形成了“隔盐层”(图 6),破坏

了土壤水的毛细作用.如图 6 所示,碎石屏障层中的碎石分选好,细小颗粒较少,导致屏障层孔隙度大,毛细力减小,降低了土壤水的毛细上升高度,从而抑制盐分随水分向上迁移.由于试验地硫酸钠含量较高,硫酸钠遇水结晶膨胀,表土易发生盐胀,土体结构遭到破坏,土壤颗粒重排,孔隙度减小,进一步增强毛细作用,盐渍化程度进一步加重(贾瑞亮等, 2016).上述过程与水分含量密切相关,碎石屏障的存在有效控制了毛细水上移到土壤表层,防止土壤盐胀带来的危害.同时,铺设碎石屏障的过程中,疏松了土壤耕作层,灌水、降雨期间水分下渗速度加快,耕作层土壤中的盐分更易随水分下移至深层.

6 组不同的碎石屏障处理中,G5 组整体效果最佳,在 0~40 cm 四个深度上土壤 EC 值平均下降 55.9%.通过不同处理效果的对比,可以发现铺设深度为 60~80 cm 的碎石屏障效果要优于铺设深度 40~60 cm 的碎石屏障;1 mm 和 3 mm 碎石上细下粗结构组成的碎石屏障效果最好.铺设深度大,毛细管在更深处被切断,毛细上升高度减小,可有效防止盐分随水分上移.上细下粗的碎石结构分选好,孔隙度相对较大,孔隙度越大,毛细上升高度越小,抑盐效果越明显.

### 3 结论

(1) 碎石屏障物理改良可有效降低土壤盐分、pH、碱化度,对 0~10 cm 表层土层降盐效果尤为显著.相对于对照组,碎石屏障还起到了一定的保肥作用.碎石屏障层的孔隙度高于土壤的孔隙度,毛细力减小,毛细上升受到抑制,形成了一段毛细阻隔层,有效抑制了盐分随水分上移到土壤耕作层.

(2) 碎石屏障粒径和结构相同的条件下,埋深为 60~80 cm 的实验组比埋深为 40~60 cm 的实验组土壤年际 EC 值、pH 下降率更大,说明其效果优于 40~60 cm 深度埋深的碎石屏障.非饱和带碎石屏障铺设越深,毛细上升高度越小,抑制盐随水分上移更有效.

(3) 埋设深度为 60~80 cm,采用粒度为 1 cm 和 3 cm 分选的碎石按上细下粗结构铺设的碎石屏障效果最佳.上细下粗分选好的碎石屏障,两层之间有土工布分隔,不仅结构更稳定,而且上层细小颗粒不易下沉堵塞孔隙;下层孔隙度大,可在更深处切断毛细管,有效抑制土壤毛细作用,防止深层土壤中的盐分上移“返盐”,实现高效改良.

### References

- Fu, L. C., Zhuang, D. Y., Guo, Z. Q., et al., 2020. Causes of Formation and Six Dimensional Improvement Method for Virginsaline-Alkali Land in Southeast Coastal Region of China. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 61(1): 157–161 (in Chinese).
- He, Y.P., 2020. Study on Influencing Factors of Capillary Rise Characteristics of Low Liquid Limit Silt. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 48(4): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- Hulin, C., Mercury, L., 2019. Regeneration of Capillary Water in Unsaturated Zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 265: 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.07.058>
- Jia, R.L., Zhou, J.L., Zhou, Y.Z., et al., 2016. Analysis on Law of Soil Salt Accumulation under Condition of High Salinity Phreatic Water Evaporation in Arid Areas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(2): 150–157 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Sun, S.H., 2014. Effects of Ameliorative Measures on Physicochemical Properties of Saline Soil in Coastal Areas. *Journal of Irrigation and Drainage*, 33(Z1): 248–250, 272 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. X., Liu, G. C., Xia, Y., et al., 2017. Use of Biochar-Compost to Improve Properties and Productivity of the Degraded Coastal Soil in the Yellow River Delta, China. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3): 780–789. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1361-1>
- Mitra, K., van Duijn, C. J., 2019. Wetting Fronts in Unsaturated Porous Media: The Combined Case of Hysteresis and Dynamic Capillary Pressure. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 50: 316–341. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2019.05.005>
- Tang, Z.J., Zuo, H.P., Yu, J., et al., 2007. Effects of Exchangeable Sodium Percentage and Clay Content on Seal Formation on Soil Surface. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23(5): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Qu, Z.Y., 2018. Progress Research on the Improvement Effect of Biochar on Salinized Farmland Soil. *Journal of Northern Agriculture*, 46(5): 68–75 (in Chinese with English abstract).
- Wei, B.H., Shen, Z. Y., Zhou, J., et al., 2020. Study on Effect and Mechanism of Improving Saline-Alkali Soil by Fenlong Tillage. *Soils*, 52(4): 699–703 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y.N., Zhong, X.L., Wang, B.C., et al., 2020. Microbial Community Structure and Function and Their Influ-



- encing Factors in the Soil of Horqin Area of Tongliao City, Inner Mongolia. *Earth Science*, 45(3): 1071–1081 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. F., Pu, L. J., Zhu, M., et al., 2019. Linkage between Soil Salinization Indicators and Physicochemical Properties in a Long-Term Intensive Agricultural Coastal Reclamation Area, Eastern China. *Journal of Soils and Sediments*, 19(11): 3699–3707. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02333-3>
- Xu, H. L., Zhou, A. G., Xiao, G. Q., et al., 2000. Arid Trend and Eco-Environmental Effect of Water-Salt Imbalance in Northwest China. *Earth Science*, 25(5): 499–504 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.M., Hu, J., Wang, Q.Q., et al., 2017. Advance and Prospect of the Research on Improvement by Dry Farming Measures of Saline-Alkali Soils in Western Songnen Plain of China. *Chinese Journal of Soil Science*, 48(1): 236–242 (in Chinese with English abstract).
- Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., et al., 2020. Effect of Soil Pore Size Distribution on Plant-Available Water and Least Limiting Water Range as Soil Physical Quality Indicators. *Pedosphere*, 30(2): 253–262. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60473-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60473-9)
- Zeng, H.B., Su, C.L., Xie, X.J., et al., 2021. Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Western Hetao Irrigation Area. *Earth Science*, 46(6): 2267–2277 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Qu, J. S., Li, H., et al., 2020. Biochar Addition Combined with Daily Fertilization Improves overall Soil Quality and Enhances Water-Fertilizer Productivity of Cucumber in Alkaline Soils of a Semi-Arid Region. *Geoderma*, 363: 114170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114170>
- Zhang, Y.C., Hong, M., Zhao, B., et al., 2019. Effects of Different Measures on the Improvement of Severe Saline Soil in Hetao Irrigation Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33(5): 309–315, 322 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z. Z., et al., 2020a. Apply Biochar to Ameliorate Soda Saline-Alkali Land, Improve Soil Function and Increase Corn Nutrient Availability in the Songnen Plain. *Science of the Total Environment*, 722: 137428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137428>
- Zhao, Y. G., Li, Y., Wang, S. J., et al., 2020b. Combined Application of a Straw Layer and Flue Gas Desulphurization Gypsum to Reduce Soil Salinity and Alkalinity. *Pedosphere*, 30(2): 226–235. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60480-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60480-6)
- Zhou, M., Liu, X. B., Meng, Q. F., et al., 2019. Additional Application of Aluminum Sulfate with Different Fertilizers Ameliorates Saline-Sodic Soil of Songnen Plain in Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 19(10): 3521–3533. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02311-9>
- Zhou, X., Xia, W. J., Zhao, Y., 2012. Study on Chloride Ion Erosion of Concrete under Saline Soil Environment. *Highway Transportation Technology (Application Technology Edition)*, 8(12): 294–298 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 韦力成, 庄定云, 郭志强, 等, 2020. 东南沿海新生盐碱地的形成原因及六维改良法探讨. *浙江农业科学*, 61(1): 157–161.
- 何艳平, 2020. 低液限粉土毛细上升特征的影响因素研究. *工程勘察*, 48(4): 11–18.
- 贾瑞亮, 周金龙, 周殷竹, 等, 2016. 干旱区高盐度潜水蒸发条件下土壤积盐规律分析. *水利学报*, 47(2): 150–157.
- 刘云, 孙书洪, 2014. 不同改良方法对滨海盐碱地修复效果的影响. *灌溉排水学报*, 33(Z1): 248–250, 272.
- 唐泽军, 左海萍, 于键, 等, 2007. ESP值和黏粒含量对土壤表面封闭作用的影响. *农业工程学报*, 23(5): 51–55.
- 王凡, 屈忠义, 2018. 生物炭对盐渍化农田土壤的改良效果研究进展. *北方农业学报*, 46(5): 68–75.
- 韦本辉, 申章佑, 周佳, 等, 2020. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理. *土壤*, 52(4): 699–703.
- 肖玉娜, 钟信林, 王北辰, 等, 2020. 通辽科尔沁地区土壤微生物群落结构和功能及其影响因素. *地球科学*, 45(3): 1071–1081.
- 徐恒力, 周爱国, 肖国强, 等, 2000. 西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应. *地球科学*, 25(5): 499–504.
- 殷厚民, 胡建, 王青青, 等, 2017. 松嫩平原西部盐碱土旱作改良研究进展与展望. *土壤通报*, 48(1): 236–242.
- 曾邯斌, 苏春利, 谢先军, 等, 2021. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制. *地球科学*, 46(6): 2267–2277.
- 张宇晨, 红梅, 赵巴音那木拉, 等, 2019. 不同措施对河套灌区重度盐渍土改良效果. *水土保持学报*, 33(5): 309–315, 322.
- 周欣, 夏文俊, 赵阳, 2012. 盐渍土环境下考虑毛细作用氯离子侵蚀混凝土研究. *公路交通科技(应用技术版)*, 8(12): 294–298.