

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19648

# 河套地区盐碱土复合调理剂配方筛选研究

王 鼎<sup>1, 2</sup>, 李跃进<sup>1, 2\*</sup>, 李青春<sup>1</sup>, 王丹澜<sup>1</sup>, 余雅婧<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;  
2. 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘 要:** 以内蒙古河套灌区典型的盐碱土为研究对象, 采用烟气脱硫石膏、腐殖酸、保水剂材料研发的复合调理剂对根区盐碱土进行综合改良, 通过室内盆栽试验, 分析不同配比烟气脱硫石膏型复合调理剂对土壤 pH 值、碱化度、全盐、盐基离子含量、养分水平、含水量、硬度及向日葵出苗率的影响。结果表明: (1) 不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后土壤 pH 值均显著降低, 降低幅度 0.45 ~ 0.79 个单位, 土壤中  $\text{Na}^+$  和  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$  含量分别降低了 9.7% ~ 20.1% 和 14.3% ~ 30.4%; (2) 不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后土壤有机质、碱解氮和含水量分别增加了 13.9% ~ 119.3%、9.1% ~ 159.2% 和 4.4% ~ 20.2%, 土壤硬度降低了 13.4% ~ 56.7%; (3) 不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后, 向日葵出苗率从 6.7% 增加到了 20.0% ~ 66.7%; 通过对盐碱土综合改良效果及向日葵出苗率进行分析, 烟气脱硫石膏型复合调理剂的最优配方为烟气脱硫石膏 2 580  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、腐殖酸 774  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、保水剂 516  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

**关键词:** 盐碱土; 烟气脱硫石膏; 腐殖酸; 保水剂

内蒙古河套灌区地处我国西北内陆, 该区降水少、蒸发高, 长期以来主要依靠引黄灌溉发展农业, 地下水位常年居高不下, 而现有的排水系统不足以维持区域内的水盐平衡, 因此土壤盐渍化仍是该区农业生产的一大障碍, 同时也是一大生态环境问题之所在<sup>[1-4]</sup>。目前针对该区土壤盐渍化问题已开展了大量的研究和治理工作。一些新的改良技术如“双层暗管水盐调控”、“上膜下秸”、“滴灌洗盐”、“石膏改良碱化类土壤技术”、“生物炭改良”、“引黄滴灌”、“耐盐碱作物种植”、“微生物治理”等都取得了一定的成效<sup>[5-6]</sup>。总体来看, 灌区土壤盐渍化程度有减轻趋势, 但土壤中大量盐分并未排走, 土壤盐渍化问题仍然严重<sup>[7]</sup>。可见, 彻底根除土壤盐渍化危害并不现实。因此在盐碱土的改良过程中, 要将思路从传统的“盐分治理”转向“盐分管理”, 即在作物生育时期内有效控制根区土壤盐分, 合理调控土壤水分和盐分的时空分布, 做到“有益无害”。

目前针对该区盐碱土的改良工作更侧重于改良

技术和单一成分调理剂的研究, 而在复合型调理剂的研发方面相对薄弱。传统的调理剂存在成分与功能单一、施用量大、需水量大、成本高、施用不便, 潜在环境污染大等问题。盐碱土调理剂的研发也逐渐趋于多元化、复合型多功能产品。因此, 本研究应用降碱改盐材料、调酸培肥材料、保水抑盐材料按不同比例复配形成盐碱土复合调理剂。通过探索复合调理剂对改善作物生长根区土壤盐、碱、水分及养分状况, 为作物根系生长的范围内创造一个“低盐低碱高水高肥”的理想环境。本研究旨在为河套灌区及相似区域内盐渍土的改良与利用提供理论依据, 为多种技术集成改良盐碱土, 提供针对性强、施用方便、需水量小、成本低、环境污染小的复合型生态调理产品。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2018 年 11 月至 2019 年 1 月, 在内蒙古农业大学温室内进行不同配比复合调理剂施用的盆栽试验。选取内蒙古河套灌区五原县 (40° 02' 19" N, 108° 20' 34" E) 典型的盐碱土作为供试土壤, 该盐碱土的主要盐分为氯化钠, 伴有少量硫酸盐和苏打盐, 碱性较高, 土壤基本性状详见表 1。试验采用 3 种材料配制复合调理剂, 烟气脱硫石膏

收稿日期: 2019-12-31; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501306)。

作者简介: 王鼎 (1989-), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士研究生, 主要研究方向为盐碱土资源利用与改良。E-mail: 15147124612@163.com。

通讯作者: 李跃进, E-mail: Liyuejing@imau.edu.cn。

材料采自内蒙古托克托县燃煤电厂，主要功能作用是脱除土壤胶体钠离子，恢复土壤团粒微结构，从而降低土壤碱性；腐殖酸材料由生产厂家提供，可起到调酸作用，同时可改善土壤理化性

状和提高土壤养分水平；聚丙烯酰胺-无机矿物杂化保水剂材料由某公司提供，具有保水和抑制土壤盐分表聚的作用。3种调理材料化学性质详见表2。

表1 盆栽试验供试土壤盐碱性质

pH 值	碱化度 (%)	含盐量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	盐基离子组成 ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )							
			$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
9.40	49.25	9.67	0.05	0.48	12.12	1.71	2.01	1.73	10.50	0.07

表2 不同类型调理材料化学性质

化学性质	不同类型调理材料		
	烟气脱硫石膏	腐殖酸	保水剂
pH 值 (1:5H <sub>2</sub> O)	8.76	4.76	7.82
有机质 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.26	634.2	—
碱解氮 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	14.15	—	36.47
有效磷 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.38	7.62	1.27
速效钾 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	50.4	147.1	24.9

### 1.2 试验设计

本研究基于“3414”试验设计，采用烟气脱硫石膏、腐殖酸、保水剂3种材料按不同比例配制形成多个复合调理剂配方。以向日葵为材料进行室内盆栽试验，研究不同复合调理剂配方施用对土壤pH值、碱化度、全盐、盐基离子、养分水平、水分、硬度及向日葵出苗率的影响。试验共设置14个处理，每个处理设5个重复。3种调理材料(T: 烟气脱硫石膏 H: 腐殖酸 S: 保水剂)在各处理中的施用量详见表3。

表3 烟气脱硫石膏型复合调理剂各处理复配材料及用量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

处理	复配材料施用量			合计用量
	烟气脱硫石膏	腐殖酸	保水剂	
T <sub>0</sub> H <sub>0</sub> S <sub>0</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0
T <sub>0</sub> H <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	0.0	774	516	1 290
T <sub>1</sub> H <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	1 290	774	516	2 580
T <sub>2</sub> H <sub>0</sub> S <sub>2</sub>	2 580	0.0	516	3 096
T <sub>2</sub> H <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	2 580	387	516	3 483
T <sub>2</sub> H <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	2 580	774	516	3 870
T <sub>2</sub> H <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	2 580	1 162.5	516	4 258.5
T <sub>2</sub> H <sub>2</sub> S <sub>0</sub>	2 580	774	0.0	3 354
T <sub>2</sub> H <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	2 580	774	258	3 612
T <sub>2</sub> H <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2 580	774	774	4 128
T <sub>3</sub> H <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	3 870	774	516	5 160
T <sub>2</sub> H <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	2 580	387	258	3 225
T <sub>1</sub> H <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	1 290	774	258	2 322
T <sub>1</sub> H <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	1 290	387	516	2 193

### 1.3 试验方法

将3种调理材料按比例和土壤充分混合后，装入(开口直径、底部直径、盆高分别为28、22、20 cm)的塑料花盆中。装土后浇充足的水(每盆等量)，放置48 h后种植向日葵，每盆播种6粒，种植向日葵品种为FY361。每个处理设5个重复(5盆)。温室白天温度保持在(26±2.5)℃，夜间温度保持在(18±1.5)℃。出苗前，每隔5 d进行一次浇水(晚上浇水，每盆等量)。种植10 d后进行出苗率统计。种植40 d后进行土壤硬度测量及土壤样品采集。每盆取土250 g左右，样品在土壤处理室自然风干，研磨后分别过筛(2、0.15 mm)，供测定相关的理化指标<sup>[8]</sup>。

### 1.4 测定指标及方法

①pH值-酸度计测定(5:1水土比)；全盐-烘干法；碱化度-乙酸钠火焰光度法。

②八大离子含量-滤液(5:1水土比)中的钾离子、钠离子用火焰光度计测定；钙离子、镁离子用EDTA滴定法；硫酸根离子用EDTA间接络合滴定法；氯离子用硝酸银滴定法；碳酸根离子、碳酸氢根离子用双指示剂中和滴定法。

③土壤有机质-重铬酸钾容量法测定；碱解氮-碱解扩散法；有效磷-NaHCO<sub>3</sub>浸提，钼锑抗比色法；速效钾-NH<sub>4</sub>OAc浸提，火焰光度法；土壤含水量-烘干法；土壤硬度用硬度计测定。

### 1.5 数据处理及分析

试验数据经Excel 2010整理后，采用SPSS 20.0软件对数据进行方差分析(one-way ANOVA)，并用Tukey法进行差异显著性检验，显著性水平设定为P=0.05。同时采用SigmaPlot 10.0软件进行作图，分析比较施用不同配比烟气脱硫石膏型复合调理剂对盐碱土改良效果及向日葵出苗的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合调理剂施用对土壤 pH 值、碱化度和全盐的影响

对不同比例配施烟气脱硫石膏、腐殖酸和保水剂改良盐碱土的效果进行分析, 各处理土壤 pH 值、碱化度和全盐含量变化趋势如图 1 所示。对照 ( $T_0H_0S_0$ ) 土壤 pH 值为 9.42, 各处理土壤 pH 值在 8.63 ~ 8.97。与对照相比, 各处理土壤 pH 值均显著下降 ( $P < 0.05$ ), 降低幅度为 0.45 ~ 0.79, 其中下降幅度最大的为  $T_2H_3S_2$  处理。同时可以看出,

在腐殖酸和保水剂配施比例不变的情况下, 土壤 pH 值随烟气脱硫石膏配施水平的增加 ( $T_0H_2S_2$ ,  $T_1H_2S_2$ ,  $T_2H_2S_2$ ,  $T_3H_2S_2$ ) 呈逐渐下降 (8.97 ~ 8.65) 趋势; 在烟气脱硫石膏和保水剂配施比例不变的情况下, 土壤 pH 值随腐殖酸配施水平的增加 ( $T_2H_0S_2$ ,  $T_2H_1S_2$ ,  $T_2H_2S_2$ ,  $T_2H_3S_2$ ) 也呈逐渐下降 (8.84 ~ 8.63) 趋势。因此可知, 土壤 pH 值降低与烟气脱硫石膏和腐殖酸的添加均有关系。对照 ( $T_0H_0S_0$ ) 土壤碱化度为 59.86%, 各处理土壤碱化度在 35.97% ~ 65.62%。与对照相比,  $T_0H_2S_2$  处理土壤碱化度显著降低, 下降幅度为 39.9% ( $P < 0.05$ )。

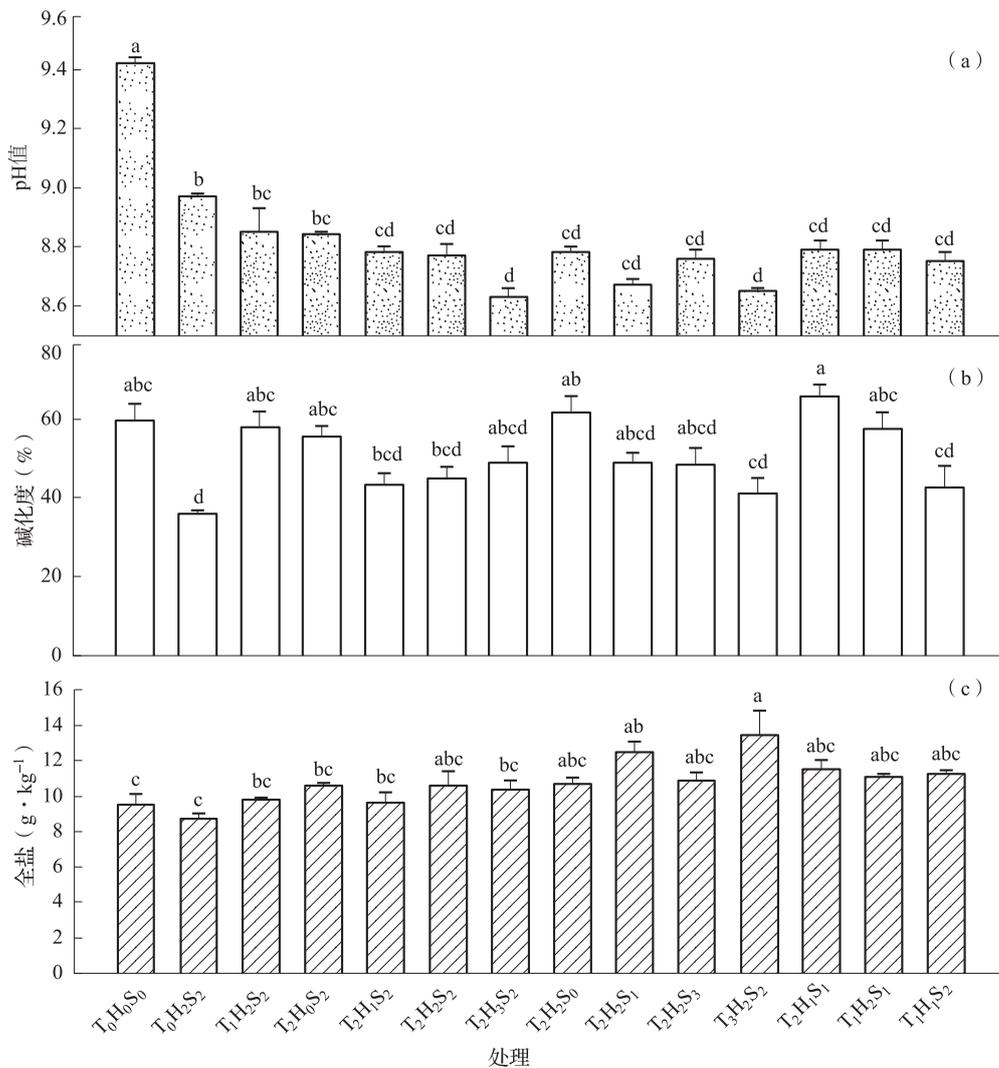


图 1 烟气脱硫石膏型复合调理剂施用对盐碱土 pH 值、碱化度和全盐的影响

注: 同一指标不同处理不同小写字母表示在  $P=0.05$  水平下差异显著, 下同。

对照 ( $T_0H_0S_0$ ) 土壤全盐含量为  $9.52 g \cdot kg^{-1}$ , 各处理土壤全盐含量在  $8.75 \sim 13.48 g \cdot kg^{-1}$ 。除  $T_2H_2S_1$  和  $T_3H_2S_2$  处理外, 其余各处理土壤全盐含

量与对照相比均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。同时可以看出, 在腐殖酸和保水剂配施比例不变的情况下, 土壤全盐含量随烟气脱硫石膏配施水平的增

加 ( $T_0H_2S_2$ ,  $T_1H_2S_2$ ,  $T_2H_2S_2$ ,  $T_3H_2S_2$ ) 呈逐渐上升 ( $8.75 \sim 13.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 趋势; 而在烟气脱硫石膏配施比例不变的情况下, 土壤全盐含量随腐殖酸和保水剂配施水平的增加变化相对较小。因此可知, 土壤全盐含量的增加主要与烟气脱硫石膏配施有关。

## 2.2 复合调理剂施用对土壤盐基离子的影响

对不同比例配施烟气脱硫石膏、腐殖酸和保水剂后土壤盐基离子含量的变化进行分析, 各处理土壤水溶性阴阳离子变化趋势如表 4 所示。对照 ( $T_0H_0S_0$ ) 土壤中  $K^+$  含量为  $0.12 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 各处理土壤中  $K^+$  含量在  $0.10 \sim 0.17 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 除  $T_0H_2S_2$ 、 $T_1H_2S_2$  和  $T_2H_1S_2$  处理外, 其余各处理土壤中  $K^+$  含量不同程度增加, 但均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。

对照土壤中  $Na^+$  含量为  $11.82 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余处理土壤中  $Na^+$  含量在  $9.44 \sim 10.67 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与对照相比下降了  $9.7\% \sim 20.1\%$ , 其中  $T_2H_0S_2$ 、 $T_2H_1S_2$ 、 $T_2H_2S_2$ 、 $T_2H_3S_2$ 、 $T_2H_2S_1$ 、 $T_2H_2S_3$ 、 $T_3H_2S_2$  和  $T_2H_1S_1$  处理土壤中  $Na^+$  含量均显著降低 ( $P<0.05$ )。对照土壤中  $Ca^{2+}$  含量为  $4.03 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余处理土壤中  $Ca^{2+}$  含量在  $5.80 \sim 14.98 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与对照相比增加了  $43.9\% \sim 271.7\%$ , 且除  $T_0H_2S_2$  处理外, 其余处理土壤中  $Ca^{2+}$  含量均显著增加 ( $P<0.05$ )。对照土壤中  $Mg^{2+}$  含量为  $2.09 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余处理土壤中  $Mg^{2+}$  含量在  $2.78 \sim 5.27 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与对照相比增加了  $33.0\% \sim 152.2\%$ , 其中  $T_2H_3S_2$ 、 $T_2H_2S_3$  和  $T_3H_2S_2$  处理土壤中  $Mg^{2+}$  含量显著增加 ( $P<0.05$ )。

表 4 烟气脱硫石膏型复合调理剂施用对土壤盐基离子的影响

( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

处理	水溶性阳离子				水溶性阴离子		
	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$CO_3^{2-}+HCO_3^-$
$T_0H_0S_0$	$0.12 \pm 0.00ab$	$11.82 \pm 0.34a$	$4.03 \pm 0.12e$	$2.09 \pm 0.27c$	$12.44 \pm 0.21abcd$	$0.32 \pm 0.01e$	$0.56 \pm 0.05a$
$T_0H_2S_2$	$0.10 \pm 0.01b$	$10.67 \pm 0.44ab$	$5.80 \pm 1.31de$	$2.78 \pm 0.20bc$	$9.73 \pm 0.41d$	$0.40 \pm 0.02e$	$0.44 \pm 0.01b$
$T_1H_2S_2$	$0.12 \pm 0.02ab$	$10.24 \pm 0.47ab$	$9.05 \pm 0.10c$	$3.45 \pm 0.62abc$	$11.20 \pm 0.75bcd$	$1.74 \pm 0.11cde$	$0.45 \pm 0.01ab$
$T_2H_0S_2$	$0.15 \pm 0.00ab$	$9.92 \pm 0.22b$	$12.87 \pm 0.45ab$	$3.61 \pm 0.01abc$	$11.97 \pm 0.24abcd$	$3.61 \pm 0.27bcd$	$0.47 \pm 0.01ab$
$T_2H_1S_2$	$0.12 \pm 0.01ab$	$9.67 \pm 0.47b$	$14.11 \pm 0.12ab$	$3.12 \pm 0.31abc$	$10.08 \pm 0.90cd$	$3.39 \pm 0.23bcd$	$0.43 \pm 0.01b$
$T_2H_2S_2$	$0.14 \pm 0.01ab$	$9.50 \pm 0.28b$	$13.80 \pm 0.33ab$	$3.48 \pm 0.27abc$	$11.43 \pm 1.29bcd$	$3.49 \pm 0.65bcd$	$0.41 \pm 0.01b$
$T_2H_3S_2$	$0.13 \pm 0.00ab$	$9.53 \pm 0.25b$	$13.96 \pm 0.27ab$	$4.48 \pm 0.34ab$	$10.81 \pm 0.88cd$	$3.46 \pm 0.25bcd$	$0.39 \pm 0.02b$
$T_2H_2S_0$	$0.13 \pm 0.02ab$	$10.20 \pm 0.22ab$	$12.91 \pm 0.66ab$	$3.28 \pm 0.23abc$	$12.52 \pm 1.02abcd$	$3.86 \pm 0.51bc$	$0.44 \pm 0.02b$
$T_2H_2S_1$	$0.15 \pm 0.01a$	$9.98 \pm 0.27b$	$13.50 \pm 0.36ab$	$3.97 \pm 0.34abc$	$13.59 \pm 1.16abcd$	$3.79 \pm 0.24bcd$	$0.45 \pm 0.02ab$
$T_2H_2S_3$	$0.17 \pm 0.01a$	$9.66 \pm 0.27b$	$13.19 \pm 0.80ab$	$4.95 \pm 0.48ab$	$10.88 \pm 1.04cd$	$4.07 \pm 0.41bc$	$0.44 \pm 0.02b$
$T_3H_2S_2$	$0.14 \pm 0.02ab$	$9.44 \pm 0.37b$	$14.98 \pm 0.36a$	$5.27 \pm 1.14a$	$11.92 \pm 0.48abcd$	$9.09 \pm 1.29a$	$0.42 \pm 0.02b$
$T_2H_1S_1$	$0.13 \pm 0.01ab$	$9.81 \pm 0.38b$	$12.24 \pm 0.32b$	$4.27 \pm 0.29abc$	$13.84 \pm 0.45abc$	$4.87 \pm 0.49b$	$0.46 \pm 0.02ab$
$T_1H_2S_1$	$0.14 \pm 0.00ab$	$10.49 \pm 0.25ab$	$9.36 \pm 0.15c$	$3.29 \pm 0.45abc$	$15.65 \pm 0.14a$	$1.37 \pm 0.12de$	$0.47 \pm 0.02ab$
$T_1H_1S_2$	$0.16 \pm 0.01a$	$10.54 \pm 0.39ab$	$7.64 \pm 0.52cd$	$2.91 \pm 0.11bc$	$15.08 \pm 0.46ab$	$1.77 \pm 0.06cde$	$0.48 \pm 0.00ab$

注: 同列数据后不同小写字母的处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

对照土壤中  $Cl^-$  含量为  $12.44 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余处理土壤中  $Cl^-$  含量在  $9.73 \sim 15.65 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中除  $T_2H_2S_0$ 、 $T_2H_2S_1$ 、 $T_2H_1S_1$ 、 $T_1H_2S_1$  和  $T_1H_1S_2$  处理外, 剩余各处理土壤中  $Cl^-$  含量不同程度降低, 但均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。对照土壤中  $SO_4^{2-}$  含量为  $0.32 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其余处理土壤中  $SO_4^{2-}$  含量在  $0.40 \sim 9.09 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与对照相比, 除  $T_0H_2S_2$ 、 $T_1H_2S_2$ 、 $T_1H_2S_1$  和  $T_1H_1S_2$  处理外, 其余各处理土壤中  $SO_4^{2-}$  含量均显著增加 ( $P<0.05$ )。对照土壤中  $CO_3^{2-}+HCO_3^-$  含量为  $0.56 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 各处理土壤中  $CO_3^{2-}+$

$HCO_3^-$  含量在  $0.39 \sim 0.48 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与对照相比下降了  $14.3\% \sim 30.4\%$ , 其中  $T_0H_2S_2$ 、 $T_2H_1S_2$ 、 $T_2H_2S_2$ 、 $T_2H_3S_2$ 、 $T_2H_2S_0$ 、 $T_2H_2S_3$  和  $T_3H_2S_2$  处理土壤中  $CO_3^{2-}+HCO_3^-$  含量均显著降低 ( $P<0.05$ )。总体来看, 不同水平施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后, 各处理土壤中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  和  $SO_4^{2-}$  不同程度增加, 而土壤中  $Na^+$  和  $CO_3^{2-}+HCO_3^-$  不同程度降低。

## 2.3 复合调理剂施用对土壤有机质及养分的影响

对不同比例配施烟气脱硫石膏、腐殖酸和保水剂后土壤养分水平的变化进行分析 (图 2)。对照

(T<sub>0</sub>H<sub>0</sub>S<sub>0</sub>) 土壤有机质含量为 10.02 g · kg<sup>-1</sup>, 各处理土壤有机质含量在 11.41 ~ 21.97 g · kg<sup>-1</sup> 之间变化, 与对照相比, 增加幅度 13.9% ~ 119.3%。其中, T<sub>2</sub>H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>H<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub>H<sub>2</sub>S<sub>2</sub> 处理土壤有机质含量均显著增加 (P<0.05)。对照 (T<sub>0</sub>H<sub>0</sub>S<sub>0</sub>) 土壤碱解氮含量为 27.86 mg · kg<sup>-1</sup>, 各处理土壤碱解氮含量在 30.39 ~ 72.20 mg · kg<sup>-1</sup> 之间变化, 增加幅度 9.1% ~ 159.2%。其中除 T<sub>2</sub>H<sub>0</sub>S<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>H<sub>1</sub>S<sub>2</sub> 和 T<sub>2</sub>H<sub>1</sub>S<sub>1</sub> 处理外, 其余各处理土壤碱解氮含量均显著增加 (P<0.05)。对照 (T<sub>0</sub>H<sub>0</sub>S<sub>0</sub>)

土壤有效磷含量为 5.93 mg · kg<sup>-1</sup>, 各处理土壤有效磷含量在 5.15 ~ 7.80 mg · kg<sup>-1</sup> 之间变化, 其中除 T<sub>2</sub>H<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 处理外, 其余处理与对照相比均无显著差异。对照 (T<sub>0</sub>H<sub>0</sub>S<sub>0</sub>) 土壤速效钾含量为 212.39 mg · kg<sup>-1</sup>, 各处理土壤速效钾含量在 218.39 ~ 239.77 mg · kg<sup>-1</sup> 之间变化, 各处理与对照相比均无显著差异 (P>0.05)。总体来看, 施用烟气脱硫石膏型复合调理剂一定程度提高了土壤有机质和碱解氮含量, 而对土壤有效磷和速效钾含量影响相对较小。

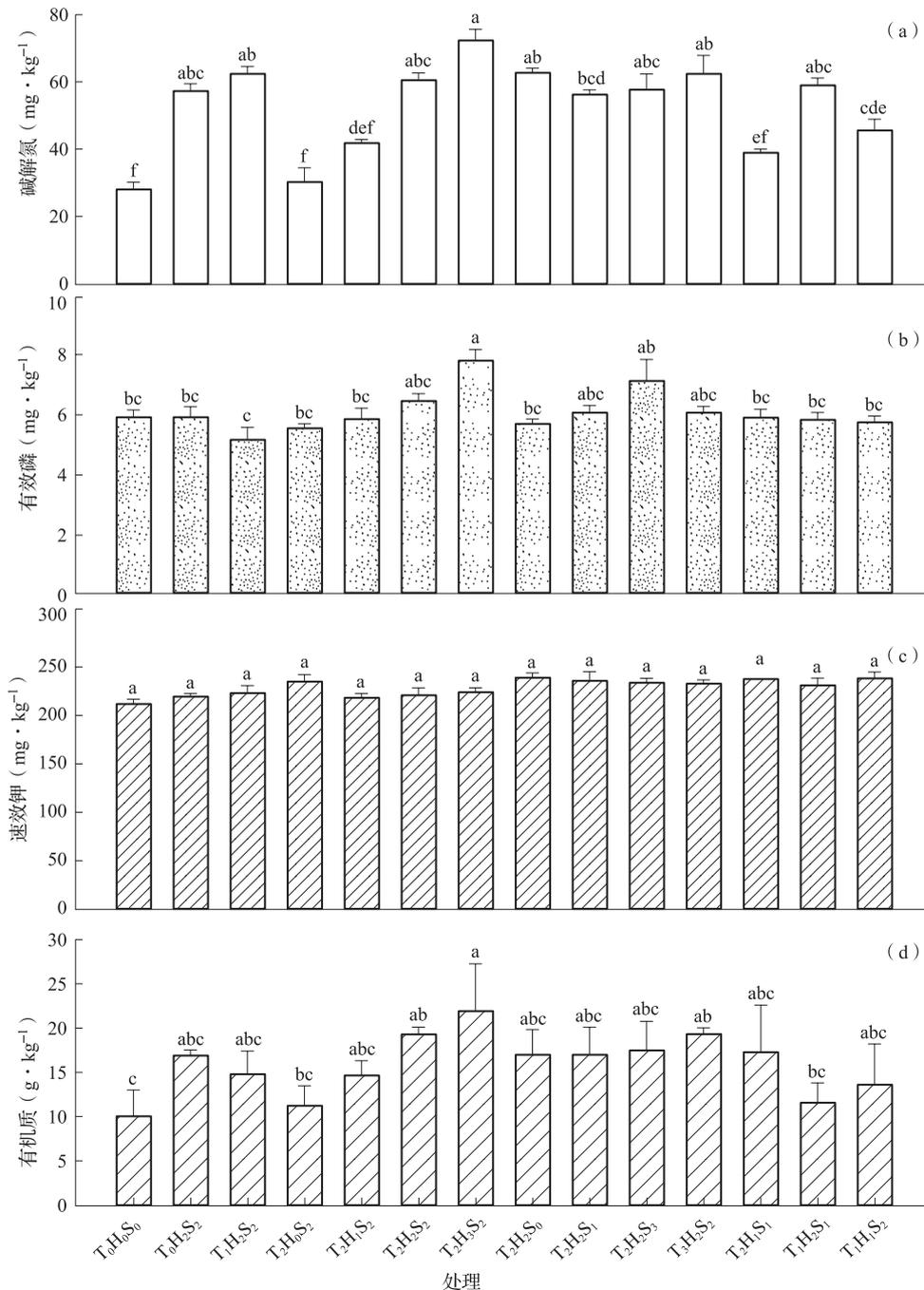


图 2 烟气脱硫石膏型复合调理剂施用对盐碱土有机质及速效养分的影响

### 2.4 复合调理剂施用对土壤水分和硬度的影响

对不同比例配施烟气脱硫石膏、腐殖酸和保水剂后土壤含水量和硬度的变化进行分析(图3)。对照( $T_0H_0S_0$ )土壤含水量为11.4%,各处理土壤含水量在11.9%~13.7%之间变化,与对照相比,增加幅度4.4%~20.2%。其中, $T_0H_2S_2$ 、 $T_2H_2S_2$ 、 $T_2H_3S_2$ 、 $T_2H_2S_3$ 和 $T_1H_1S_2$ 处理土壤含水量均显著增加( $P<0.05$ )。同

时可以看出,在烟气脱硫石膏和腐殖酸配施比例不变的情况下,土壤含水量随着保水剂配施比例的增加( $T_2H_2S_0$ 、 $T_2H_2S_1$ 、 $T_2H_2S_2$ 、 $T_2H_2S_3$ )呈逐渐上升趋势(11.9%~13.7%)。对照( $T_0H_0S_0$ )土壤硬度为200.0  $kg \cdot cm^{-2}$ ,各处理土壤硬度在86.7~173.3  $kg \cdot cm^{-2}$ 之间变化,与对照相比,各处理土壤硬度均显著降低( $P<0.05$ ),下降幅度13.4%~56.7%。

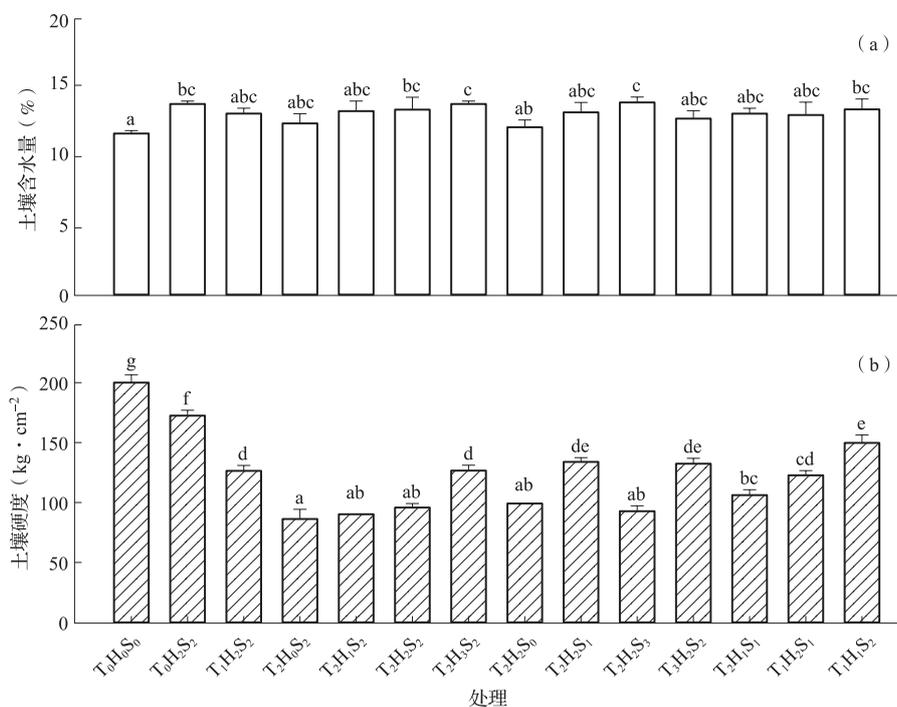


图3 烟气脱硫石膏型复合调理剂施用对土壤含水量和硬度的影响

### 2.5 复合调理剂施用对向日葵出苗率的影响

对不同比例配施烟气脱硫石膏、腐殖酸和保水剂后向日葵出苗率的变化进行分析(图4)。对照( $T_0H_0S_0$ )向日葵出苗率为6.7%,不同比例配施烟气脱硫石膏型复合调理剂后向日葵出苗率在20.0%~66.7%之间变化。与对照相比,除 $T_0H_2S_2$ 、

$T_1H_2S_2$ 、 $T_2H_0S_2$ 、 $T_1H_2S_1$ 和 $T_1H_1S_2$ 处理外,其余各处理向日葵出苗率均显著升高( $P<0.05$ ),其中出苗率相对较好的处理为 $T_2H_3S_2$ (63.3%)、 $T_2H_2S_2$ (66.7%)。同时可以看出,在腐殖酸和保水剂配施比例不变的情况下,向日葵出苗率随烟气脱硫石膏配施水平的增加呈先增加后下降趋势。

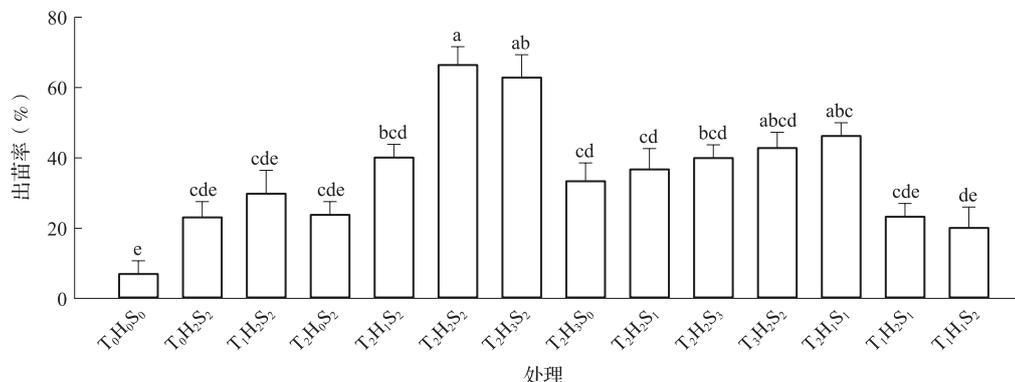


图4 烟气脱硫石膏型复合调理剂施用对向日葵出苗率的影响

### 3 讨论

#### 3.1 土壤 pH 值、碱化度和全盐对复合调理剂施用的响应

碱化土壤的高 pH 值主要受土壤胶体中交换性  $\text{Na}^+$  和水溶性  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  的控制<sup>[9]</sup>。本研究发现不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后土壤 pH 值均显著降低。出现这一结果的原因有多个方面。首先主要是本次研发复合调理剂配方中有一定量的腐殖酸, 腐殖酸中含有大量的活性基团(羧基、醇羟基、酚羟基、羰基和甲氧基), 其酸性较强, 可对盐碱土起到一定调酸作用, 同时腐殖酸的添加可增加阳离子交换量, 促进了对土壤胶体上  $\text{Na}^+$  的代换, 起到一定降碱作用<sup>[10-12]</sup>。南江宽等<sup>[13]</sup>在江苏滨海盐渍土的改良研究中也发现, 腐殖酸的添加可显著降低土壤 pH 值和钠吸附比。其次, 复合调理剂中的烟气脱硫石膏溶解后提供钙离子, 可置换土壤胶体上的  $\text{Na}^+$ , 改善土壤通透性, 加速脱盐过程, 同时  $\text{Ca}^{2+}$  可与土壤中  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  反应生成难溶固体, 从而降低土壤 pH 值和碱化度<sup>[14-16]</sup>。此外, 腐殖酸的配施可以加速复合调理剂中烟气脱硫石膏的溶解, 从而加速  $\text{Ca}^{2+}$  对土壤胶体  $\text{Na}^+$  的置换作用, 有利于土壤 pH 值和碱化度的降低<sup>[12]</sup>。本研究还发现, 保水剂的配施对土壤 pH 值影响相对较小, Rajpar 等<sup>[17]</sup>在碱土改良的过程中也发现, 添加聚丙烯酰胺对土壤 pH 值和碱化度的影响很小。

土壤盐化是干旱半干旱地区农业生产的主要限制因子<sup>[18]</sup>。Bolan 等<sup>[19]</sup>研究发现, 由于石膏溶解, 土壤中水溶性  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量显著增加, 短时间内土壤盐分可能出现增加。Yang 等<sup>[20]</sup>利用烟气脱硫石膏对西北干旱区盐碱土进行了改良, 研究发现烟气脱硫石膏溶解产生的可溶性  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  会导致土壤全盐含量短时间增加。本研究也发现, 土壤全盐含量随烟气脱硫石膏配施比例的增加而增加。有研究表明由于烟气脱硫石膏的改良作用, 土壤全盐虽短时间增加, 但土壤中部分盐分类型发生转变成危害较小的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 因此对作物盐胁迫相对较小<sup>[14]</sup>。Zhao 等<sup>[21]</sup>利用烟气脱硫石膏对松嫩平原苏打盐碱土和鄂尔多斯高原碱化盐土进行了改良, 研究则发现土壤胶体上  $\text{Na}^+$  被  $\text{Ca}^{2+}$  置换到土壤水溶液后, 在灌水作用下有向下运动趋势, 表层土壤含盐量显著下降。由此可知, 这种短暂的积盐可能是由于烟气脱硫石膏溶解造成的, 但

随着改良时间的推移, 在灌水和降水的作用下土壤积盐会逐渐降低。本研究还发现腐殖酸配施对土壤全盐含量影响较小, 这可能是由于腐殖酸配施虽加速了烟气脱硫石膏的溶解, 但同时也降低了土壤容重, 增加了盐渍土的渗透性, 有利于土壤盐分的淋洗<sup>[11, 22]</sup>。

#### 3.2 土壤盐基离子对复合调理剂施用的响应

本研究发现不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后, 各处理中  $\text{Na}^+$  的浓度都有一定下降趋势。首先烟气脱硫石膏型复合调理剂的主要成分是烟气脱硫石膏, 溶解产生的  $\text{Ca}^{2+}$  可以置换吸附于土壤胶体上的  $\text{Na}^+$ , 在灌水的作用下, 有利于  $\text{Na}^+$  从土体中脱除<sup>[20]</sup>。其次, 腐殖酸的配施可一定程度提高土壤阳离子交换量, 从而促进高价离子对  $\text{Na}^+$  的置换, 也在一定程度上降低了土壤溶液中  $\text{Na}^+$  的含量<sup>[11]</sup>。Yazdanpanah 等<sup>[23]</sup>的研究也发现, 石膏添加后  $\text{Ca}^{2+}$  对土壤胶体上  $\text{Na}^+$  有置换作用, 为土壤胶体吸附  $\text{K}^+$  创造了条件。显然, 烟气脱硫石膏的溶解可以增加土壤  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度<sup>[24-25]</sup>。本研究也得到相似的结果, 即土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度随烟气脱硫石膏配施比例的增加而增加。研究还发现, 土壤中  $\text{Mg}^{2+}$  浓度随烟气脱硫石膏配施量增加呈上升趋势。出现这一结果的原因主要有两方面。首先, 烟气脱硫石膏溶解会产生  $\text{Ca}^{2+}$ , 可以置换土壤胶体上吸附的  $\text{Mg}^{2+}$ , 从而导致  $\text{Mg}^{2+}$  在土壤溶液中积累。其次, 电厂产生的烟气脱硫石膏中含有少量的镁, 溶解后会有一部分  $\text{Mg}^{2+}$ <sup>[24]</sup>。

本研究发现, 不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后, 土壤中  $\text{Cl}^-$  含量有一定下降趋势, 这主要是由于施用烟气脱硫石膏型调理剂增加了盐渍土的渗透性, 这有利于  $\text{Cl}^-$  的淋洗<sup>[22]</sup>。烟气脱硫石膏型复合调理剂施用显著增加了土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量, 同样是由于烟气脱硫石膏的溶解作用造成的, 但有研究表明硫酸根离子对农作物的危害相对较小<sup>[26]</sup>。值得注意的是, 不同比例施用烟气脱硫石膏复合调理剂处理后, 土壤中  $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$  含量均不同程度的降低。出现这一结果的原因主要有两方面。首先, 烟气脱硫石膏添加到土壤后, 溶解产生的  $\text{Ca}^{2+}$  可与土壤中  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  反应产生难溶物质, 从而降低碳酸氢根离子的含量<sup>[24, 26]</sup>。此外腐殖酸的配施增加了土壤中  $\text{H}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度, 促进了土壤中  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  形成二氧化碳和碳酸钙<sup>[27]</sup>。

### 3.3 土壤有机质及速效养分对复合调理剂施用的响应

土壤有机质、速效氮磷钾是土壤中最重要 的肥力指标,对评估耕地质量有重要意义。总体来看,不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂均一定程度提高了土壤有机质和速效氮的含量,这主要与复合调理剂中配施腐殖酸有关<sup>[28-29]</sup>。腐殖酸不仅可以为植物生长提供营养,还对土壤物理、化学和生物性质有积极影响,对土壤肥力水平的改善与维持有重要作用<sup>[22]</sup>。腐殖酸是非常稳定的氮源,是一种有效的缓释氮肥<sup>[30]</sup>。换句话说,土壤速效氮含量与土壤有机质含量高度相关<sup>[23]</sup>。John 等<sup>[31]</sup>的研究还发现在土壤中添加聚丙烯酰胺可有效抑制  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的流失,有一定保肥作用。Matosic 等<sup>[32]</sup>的研究则发现烟气脱硫石膏等改良物质不仅自身含有少量氮,还间接为氮肥转化创造了良好的条件,这可能也是土壤中速效氮含量提高的一个原因。早期的研究还发现,石膏本身含钾较少,但石膏添加为土壤胶体吸附  $\text{K}^+$  间接创造了条件<sup>[29]</sup>。本研究则发现不同比例施用复合调理剂后,各处理土壤速效钾含量均无显著变化。这可能是由于供试土壤速效钾含量 ( $216.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 较高,而烟气脱硫石膏型复合调理剂的施用不足以提高现有土壤速效钾含量。

### 3.4 土壤水分和土壤水硬度对复合调理剂施用的响应

干旱缺水是抑制西北内陆发展农业的关键因子。目前,河套灌区的引黄水量被大幅压缩(由  $5.2 \times 10^9 \text{ m}^3$  减为  $4.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ),因此提高水资源利用效率对该区农业持续发展有重要意义。本研究发现不同比例施用复合调理剂后土壤含水量均不同程度提高,这主要与各复合调理剂中配施保水剂有关<sup>[33]</sup>。穆俊祥等<sup>[34]</sup>的研究也发现保水剂的施用可显著提高耕层土壤含水量。保水剂属高分子电解质,分子之间呈复杂三维网状结构,使其具有一定的交联度。当保水剂与水接触时,由于交联网状结构上有许多羟基、羧基等亲水基团,分子表面的亲水性基团电离并与水分子结合成氢键,通过这种方式该材料能够吸取大量水分<sup>[35]</sup>。本研究也发现土壤含水量随保水剂配施比例的增加而增加。此外,土壤含水量随腐殖酸配施比例的增加也有一定上升趋势。腐殖酸是一种含有羟基、羧基和酚羟基活性基团的天然有机化合物,施用到土壤中可降低土壤容重,增加土壤孔隙度,一定程度上可增加土壤持

水能力<sup>[28-29]</sup>。

盐碱土通常质地致密,粘土含量高,导致土壤表层硬度较大。此外,盐碱土碱性高且含有大量交换性钠,导致土壤颗粒变得分散难以形成团粒结构,导致土壤结构变得紧实,土壤硬化现象明显<sup>[36]</sup>。本研究发现不同比例施用复合调理剂后土壤硬度均显著降低,改良效果显著。土壤硬度下降的原因是多方面的。首先,复合调理剂施用后土壤 pH 值均显著下降,土壤胶体上吸附的  $\text{Na}^+$  也一定程度下降,钠离子对土壤分散作用减弱,土壤物理性质得到改善,土壤硬度降低<sup>[11, 20]</sup>。其次,复合调理剂中都添加有一定量的保水剂,保水剂吸水后体积膨胀数十倍,对土壤起到疏松作用,同时保水剂还可以促进土壤团粒结构形成,从而降低了土壤硬度<sup>[37]</sup>。最后,腐殖酸配施也可降低土壤容重,增加土壤孔隙度,一定程度上也会降低土壤硬度<sup>[27-28]</sup>。

### 3.5 向日葵出苗率对复合调理剂施用的响应

作物出苗率可直接反映复合调理剂的改良效果。本研究发现不同比例施用复合调理剂后向日葵出苗率均一定程度增加。出现这一结果的原因主要有四方面:(1)不同比例施用复合调理剂后土壤 pH 值均显著降低,减轻了对作物的危害。(2)添加腐殖酸不仅提高了速效养分水平,还改善了土壤物理性状,从而促进了作物出苗<sup>[28]</sup>。(3)保水剂施用可一定程度提高土壤含水量,有利于作物出苗<sup>[34]</sup>。(4)不同比例施用复合调理剂后均显著降低了土壤硬度,土壤结皮现象减轻有利于作物出苗<sup>[37]</sup>。Rubio 等<sup>[38]</sup>的研究也发现聚丙烯酰胺施用可提高碱地鼠尾粟的出苗率。本研究还发现随烟气脱硫石膏配施比例的增加,向日葵出苗率呈先增加后下降的趋势,这可能是由于调理材料过量施用导致土壤积盐所致<sup>[14-15]</sup>。

## 4 结论

通过盆栽试验,研究烟气脱硫石膏、腐殖酸、保水剂配施对河套地区盐碱土 pH 值、碱化度、全盐、盐基离子含量、养分水平、水分及土壤硬度的改良效应以及对向日葵出苗率的影响。对试验结果进行了比对和分析,得出以下结论:(1)不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后土壤 pH 值均显著降低,降低幅度 0.45 ~ 0.79 个单位,土壤中  $\text{Na}^+$  和  $\text{CO}_3^{2-}+\text{HCO}_3^-$  含量分别降低了 9.7% ~ 20.1% 和 14.3% ~ 30.4%;(2)不同比例施用烟气脱硫石

膏型复合调理剂后土壤有机质、碱解氮和含水量分别增加了 13.9% ~ 119.3%、9.1% ~ 159.2% 和 4.4% ~ 20.2%，土壤硬度降低了 13.4% ~ 56.7%；(3) 不同比例施用烟气脱硫石膏型复合调理剂后向日葵出苗率从 6.7% 增加到了 20.0% ~ 66.7%；(4) 通过对盐碱土综合改良效果及向日葵出苗率进行分析，烟气脱硫石膏型复合调理剂的最优配方为  $T_2H_2S_2$  (烟气脱硫石膏 2 580 kg · hm<sup>-2</sup>、腐殖酸 774 kg · hm<sup>-2</sup>、保水剂 516 kg · hm<sup>-2</sup>)。

### 参考文献:

- [1] 王遵亲. 中国盐碱土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] Rasouli F, Pouya A K, Karimian N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum [J]. *Geoderma*, 2013, 193: 246-255.
- [3] Bencherif K, Boutekrabi A, Fontaine J, et al. Impact of soil salinity on arbuscular mycorrhizal fungi biodiversity and microflora biomass associated with *Tamarix articulata* Vahl rhizosphere in arid and semi-arid Algerian areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 533: 488-494.
- [4] Wu Y, Li Y, Zheng C, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 32-40.
- [5] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响 [J]. *土壤*, 2019, 51 (3): 524-529.
- [6] 赵永敢. “上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [7] 张微, 娄金勇, 程维新, 等. 内蒙古河套灌区水利工程对土壤盐渍化的影响 [J]. *环境科学研究*, 2003, (4): 12-14.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [9] Mashhady A S, Rowell D L. Soil alkalinity. I. Equilibria and alkalinity development [J]. *Journal of Soil Science*, 1978, 29 (1): 65-75.
- [10] 邵华伟, 崔磊, 许咏梅, 等. 滴施改良剂对新疆盐碱土改良及甜菜产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 49-53.
- [11] Zhang Y, Chen S, Li F, et al. Research on effects of desulfurization gypsum, humic acid and biochar on Chinese coastal saline-alkali soil improvement [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, 26 (11): 6958-6965.
- [12] Li F Z, Huang Z B, Ma Y, et al. Improvement effects of different environmental materials on coastal saline-alkali soil in Yellow River Delta [C] // Materials science forum. Stafa-Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2018, 913: 879-886.
- [13] 南江宽, 陈效民, 王晓洋, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土盐碱指标及作物产量的影响研究 [J]. *土壤*, 2013, 45 (6): 1108-1112.
- [14] 张海军. 内蒙古农业大学海流园区碱土改良试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [15] 王静, 许兴, 肖国举, 等. 脱硫石膏改良宁夏典型龟裂碱土效果及其安全性评价 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (2): 141-147.
- [16] 程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34 (6): 1505-1513.
- [17] Rajpar I, Sial N B, Talpur U. Effect of soil sodicity on the growth, ion content and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Applied Science*, 2004, 4: 649-653.
- [18] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, (9): 23-26.
- [19] Bolan N S, Syers J K, Sumner M E. Dissolution of various sources of gypsum in aqueous solutions and in soil [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1991, 57 (4): 527-541.
- [20] Yang Z, Zhang Q, Liang L, et al. Remediation of heavily saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in Arid-Inland China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, 64 (4): 526-534.
- [21] Zhao Y, Wang S, Li Y, et al. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China [J]. *Geoderma*, 2018, 321: 52-60.
- [22] Oo A N, Iwai C B, Saenjan P. Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava - industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26 (3): 300-310.
- [23] Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, et al. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (II): Impact on nitrogen, phosphorous and potassium redistribution and on microbial respiration [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 39-45.
- [24] Mao Y, Li X, Dick W A, et al. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 45: 224-232.
- [25] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 121: 82-92.
- [26] Liu Y, Zhou S, Sun J, et al. Optimum combination of soil amendments under drip irrigation with different water sources in coastal areas of East China [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2018, 16 (3): 1102.
- [27] Goebel M O, Bachmann J, Woche S K, et al. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter [J]. *Geoderma*, 2005, 128 (1-2): 80-93.
- [28] Türkmen, Dursun A, Turan M, et al. Calcium and humic

- acid affect seed germination, growth, and nutrient content of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings under saline soil conditions [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2004, 54 (3): 168-174.
- [29] Sharif M, Khattak R A, Sarir M S. Effect of different levels of lignitic coal derived humic acid on growth of maize plants [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33 (19-20): 3567-3580.
- [30] Melero S, Madejón E, Ruiz J C, et al. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26 (3): 327-334.
- [31] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use [J]. *Geoderma*, 2005, 128 (1-2): 63-79.
- [32] Matosic S, Birkás M, Vukadinovic V, et al. Tillage, manure and gypsum use in reclamation of saline-sodic soils [J]. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 2018, 83 (2): 131-138.
- [33] 李培培, 仝昊天, 翟庆慧, 等. 不同保水措施对砂质潮土水分、微生物量及小麦产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (4): 78-83.
- [34] 穆俊祥, 孟宁生, 刘拴成, 等. 保水剂用量对马铃薯生长和土壤水分的影响 [J]. *节水灌溉*, 2017, (2): 44-47.
- [35] 张浣中. 保水剂对土壤理化性质的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [36] Chaudhri K G, Das D K. Emergence of soybean, cotton and maize seedlings as influenced by crust formation in salt-affected soils [J]. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1978, 26 (2): 106-111.
- [37] Helalia A M, Letey J. Effects of different polymers on seedling emergence, aggregate stability, and crust hardness [J]. *Soil Science*, 1989, 148 (3): 199-203.
- [38] Rubio H O, Wood M K, Cardenas M, et al. Effect of polyacrylamide on seedling emergence of three grass species [J]. *Soil Science*, 1989, 148 (5): 356-360.

**Study on the optimum formulation selection of compound conditioner for saline-alkali soil in Hetao area**

WANG Ding<sup>1, 2</sup>, LI Yue-jin<sup>1, 2\*</sup>, LI Qing-chun<sup>1</sup>, WANG Dan-lan<sup>1</sup>, YU Ya-jing<sup>1</sup> (1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, Hohhot Inner Mongolia 010018)

**Abstract:** Taking the typical saline-alkali soil in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia as the research object, the comprehensive improvement effects of compound conditioner formulations made by different proportions of flue gas desulfurization (FGD) gypsum, humic acid and super absorbent polymer on saline-alkali soil in the root zone of crop growth were explored by pot experiments. The soil pH, alkalinity, total salt, water-soluble salt ions, nutrient contents, moisture, hardness of saline-alkali soil and the germination rate of sunflower were compared and analyzed. The results showed that: (1) After applying FGD gypsum compound conditioners in different proportions, the soil pH was significantly reduced by 0.45 ~ 0.79 units, and the content of Na<sup>+</sup> and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> were reduced by 9.7% ~ 20.1% and 14.3% ~ 30.4%, respectively. (2) Soil organic matter, available nitrogen and water content increased by 13.9% ~ 119.3%, 9.1% ~ 159.2% and 4.4% ~ 20.2% respectively, soil hardness decreased by 13.4% ~ 56.7% after applying FGD gypsum compound conditioner in different proportions. (3) Sunflower germination rate increased from 6.7% to 20.0% ~ 66.7% after applying FGD gypsum compound conditioner in different proportions. By analyzing the comprehensive improvement effects on saline-alkali soil and the germination rate of sunflower, the optimal formula of FGD gypsum compound conditioner was FGD gypsum 2 580 kg · hm<sup>-2</sup>, humic acid 774 kg · hm<sup>-2</sup>, super absorbent polymer 516 kg · hm<sup>-2</sup>.

**Key words:** saline-alkali soil; FGD gypsum; humic acid; super absorbent polymer