

# 不同措施对河套灌区重度盐渍土改良效果

张宇晨, 红梅, 赵巴音那木拉, 常菲, 李艳勤, 温馨

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

**摘要:** 为了探究不同灌溉模式施加不同改良剂对河套灌区重度盐渍土的改良效果, 设置秸秆深埋(SL)、石膏+有机肥(SF)、对照(CK)3个处理, 对河套灌区重度盐渍土土壤盐分在 0—70 cm 剖面上的分布特点进行研究。结果表明: 不同灌溉模式, SL 和 SF 处理在 0—15 cm 土层均有效降低土壤 pH, 随改良时间延长改良深度增加 pH 持续降低, 有一定的长效性, 滴灌 SL 与 SF 处理 pH 较 CK 分别下降 0.35, 0.49, 黄灌下降 0.42, 1.33, 对 30—70 cm 土层影响较小。SF 处理碱化度第 2 年下降达 43%, SL 处理为 40%, 滴灌更利于碱化度降低。从抑制盐分积累来看, SL 与 SF 处理能有效抑制盐分 0—15 cm 土层聚集, 黄灌 SL 与 SF 处理较 CK 分别下降 13.60%, 7.70%, 滴灌分别下降 31.60%, 6.90%, SL 处理抑盐效果较显著。土壤盐基离子表明, 不同灌溉模式, SL 与 SF 处理均显著降低 0—15 cm 土层  $\text{Na}^+$  与  $\text{HCO}_3^-$  的含量, 滴灌降低比例高于黄灌, 随着改良时间延长效果越显著, 15—70 cm 土层无明显变化。石膏加有机肥的施入提高 0—70 cm 土层  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Cl}^-$  的含量。通过对比分析, 对河套灌区重度盐渍土治理而言, 秸秆深埋和石膏+有机肥均能有效抑制重度盐渍土土壤积盐, 有效降低 pH 及碱化度。整体来看, 滴灌模式下石膏+有机肥改良效果优于秸秆深埋。

**关键词:** 改良措施; 灌溉模式; 河套灌区; 盐碱地

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0309-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.045

## Effects of Different Measures on the Improvement of Severe Saline Soil in Hetao Irrigation Area

ZHANG Yuchen, HONG Mei, ZHAO Bayinamula, CHANG Fei, LI Yanqin, WEN Xin

(Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

**Abstract:** In order to explore the effects of different irrigation modes on the improvement of severe saline soil in Hetao Irrigation District, this experiment set up three treatments of straw deep burial (SL), gypsum + organic fertilizer (SF) and control (CK), and the distribution characteristics of soil salinity in the 0—70 cm profile of the soil were studied. The results showed that under different irrigation patterns, SL and SF effectively reduced soil pH in 0—15 cm soil layer, the pH decreased continuously with the extension of the treatment time and the increasing of improvement depth. Compared with CK, the pH of SL and SF under drip irrigation decreased by 0.35 and 0.49, respectively, and that of SL and SF under yellow river irrigation decreased by 0.42 and 1.33, respectively, while irrigation mode had little effect on 30—70 cm soil layer. The alkalinity of SF decreased by 43% in the second year and that of SL decreased by 40%, drip irrigation was beneficial to the reduction of alkalinity. In terms of inhibiting salt accumulation, SL and SF could effectively inhibit the aggregation of salt in 0—15 cm soil layer. Compared with CK, the salt of SL and SF under yellow river irrigation decreased by 13.60% and 7.70%, respectively, and that under drip irrigation decreased by 31.60% and 6.90%, respectively. SL had significant salt inhibition effect. The soil salt-based ions showed that the SL and SF significantly reduced the contents of  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$  in 0—15 cm soil layer under different irrigation modes, the reduction ratio of drip irrigation was higher than that of yellow river irrigation, and the effect was more obvious with the extension of the improvement time. While there was no significant change in 15—70 cm soil layer. The application of gypsum and organic fertilizer increased the contents of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,

收稿日期: 2019-03-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501300)

第一作者: 张宇晨(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤资源利用与保护研究。E-mail: 840196161@qq.com

通信作者: 红梅(1970—), 女, 博士生导师, 主要从事草原土壤利用与保护研究。E-mail: nmhm1970@sina.com

$\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Cl}^-$  in 0—70 cm soil layer. Through comparative analysis, for the treatment of severe saline soil in Hetao Irrigation Area, both deep burying and gypsum + organic fertilizer could effectively inhibit salt accumulation in severe saline soil, reduce pH and alkalinity. Overall, the improvement effect of gypsum + organic fertilizer under drip irrigation mode was better than the deep straw burial.

**Keywords:** improvement measures; irrigation mode; Hetao irrigation area; saline-alkali land

土壤盐碱化和次生盐碱化问题在世界范围内广泛存在,已成为世界灌溉农业可持续发展的资源制约因素<sup>[1]</sup>。据联合国粮食及农业组织(FAO)<sup>[2]</sup>统计,全世界盐渍土总面积为 3.97 亿  $\text{hm}^2$ , 约占陆地总面积的 3.10%, 中国盐碱地面积位居世界前列, 总面积约为 3 600 万  $\text{hm}^2$ , 占全国可利用土地面积的 4.88%<sup>[3]</sup>。盐碱地作为一种重要的土地资源其盐分积累是在一定环境下形成的, 主要原因是气候因素、地形因素、人为措施等方面的影响。采用合理的改良措施可以有效改善土壤结构及理化性质, 国内外已经做了大量研究<sup>[4-5]</sup>并取得一些成功的经验成果。石膏、有机肥、秸秆深埋是 3 种改良盐碱地的有效措施, 其良好的结构和理化性质使其有较好的离子代换及调控水盐运动的能力, 对改良盐碱地有很好的应用前景。脱硫石膏在改良盐碱地中广泛应用, 有研究<sup>[6-7]</sup>表明, 施加脱硫石膏可以显著降低盐碱土壤 pH、碱化度, 改善土壤理化性质。脱硫石膏虽然对盐碱地有较好的改良作用, 但施加过多会使土壤盐分含量增加, 而且对提高土壤养分含量作用很小<sup>[8]</sup>。有机肥改良盐碱化土壤主要通过影响土壤中可溶盐和水溶性离子的运动来实现, 抑制水盐上移的能力, 促进土壤脱盐, 抑制土壤返盐<sup>[9]</sup>。而且作为一种完全肥料, 有丰富营养元素供作物吸收。秸秆深埋可以形成“隔层”破坏毛细管的连续性, 防止潜水的蒸发, 从而有效降低土壤盐分, 利于作物生长。

盐分在地表的累积不仅会影响土壤的理化性质, 随着土壤盐离子浓度的升高, 降低了作物的水分利用效率, 造成离子毒害, 降低作物对养分的吸收, 进而危害农作物的生长, 限制农业生产力的可持续发展<sup>[10]</sup>。滴灌因其水肥同步等优点, 在改良盐碱地被广泛应用, 现有的研究<sup>[11]</sup>表明, 滴灌可有效促进土壤脱盐, 降低盐分。河套灌区是中国三大灌区之一, 作为内蒙古重要的粮食生产基地, 当地农业灌溉大都采用黄河漫灌的方式, 这使得地下水位迅速增高, 且水分利用率极低, 强烈的蒸发使得大量盐类在地表聚集, 灌溉以后, 当地土壤盐碱化程度不断加重, 可溶性盐和非可溶性盐耕地与荒地都有增加。因此, 采取有效的措施改良盐碱地是该地区研究的重点。前人改良重度盐渍土大多采用单一的改良方式, 即单独施加石膏或有机肥, 在不同灌溉模式下将二者结合与秸秆深埋措施下的对比

及改良长效性的探究鲜有报道, 本研究在河套灌区现有的耕作措施以及田间管理条件下, 在重度盐渍土覆膜种植作物以滴灌和传统大水漫灌的方式采用秸秆深埋及施加石膏+有机肥 2 种改良措施, 探究其对重度盐渍土的改良效果。这对于合理科学地改良利用盐碱地, 改善盐碱地理化性质和土壤肥力特性, 提高作物产量, 为河套灌区保护和改善农业生态环境, 促进灌区农业的可持续发展有一定积极的意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验区位于内蒙古杭锦后旗三道桥( $106^{\circ}34'$ — $107^{\circ}24'E$ ,  $40^{\circ}26'$ — $41^{\circ}13'N$ ), 该地区位于巴彦淖尔市中西部, 地处河套平原。海拔 1 032~1 050 m, 属温带大陆性气候, 昼夜温差大, 年降雨较少且蒸发强烈, 无霜期较长, 年均无霜期 135 d, 昼夜平均温差  $8.2^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量 138.20 mm, 蒸发量 2 096.40 mm。该地区土壤盐渍化程度严重, 试验区土壤以硫酸盐型重度盐化土为主, 有机质含量为 9.80 g/kg, 有效磷含量为 7.90 mg/kg, 速效钾含量为 304.20 mg/kg, 碱解氮含量为 7.10 mg/kg, 土壤表层理化性质: pH 为 8.91, 全盐含量为 14.30 g/kg, 碱化度为 28.20%,  $\text{K}^+$  含量为 0.30 cmol/kg,  $\text{Na}^+$  含量为 7.98 cmol/kg,  $\text{Ca}^{2+}$  含量为 2.69 cmol/kg,  $\text{Mg}^{2+}$  含量为 2.85 cmol/kg,  $\text{CO}_3^{2-}$  含量为 0.01 cmol/kg,  $\text{HCO}_3^-$  含量为 0.49 cmol/kg,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量为 7.78 cmol/kg,  $\text{Cl}^-$  含量为 2.01 cmol/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用裂区设计下种植葵花, 主处理为不同灌溉方式, 黄河水漫灌、膜下滴灌 2 种方式, 次处理为不同改良剂, 在当地农民常规施肥的基础上设置秸秆深埋(SL)、石膏+有机肥(SF)、对照(CK), 试验共 6 种处理, 3 次重复, 小区面积 147  $\text{m}^2$ 。SL 处理: 玉米秸秆 12 t/ $\text{hm}^2$ , 粉碎埋于距地表 40 cm 处; SF 处理: 市售石膏 45 t/ $\text{hm}^2$ 、有机肥 45 t/ $\text{hm}^2$ ; CK: 农民常规施肥: 磷酸二铵 300 kg/ $\text{hm}^2$  做基肥+尿素 420 kg/ $\text{hm}^2$  做追肥。2 种改良措施只在第 1 年施加。

### 1.3 田间管理

试验于 2017—2018 年进行, 供试作物葵花品种为“902”, 5 月 27 日进行人工播种, 播种前每行覆膜, 各处理于播种前施底肥, 300 kg/ $\text{hm}^2$  磷酸二铵, 75 kg/ $\text{hm}^2$  硫酸钾; 6 月 28 日追施 300 kg/ $\text{hm}^2$  尿素; 8 月 5 日追施 75

kg/hm<sup>2</sup>尿素;8月24日第3次追肥,追施45 kg/hm<sup>2</sup>尿素和30 kg/hm<sup>2</sup>钾肥。施肥用量均以商品推荐用量为主,滴灌区采用膜下滴灌,每行葵花铺设1条滴灌带,滴灌肥料溶解水后随水进入土壤,分10次进行灌溉,灌溉

量为2300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,黄灌区采用黄河水漫灌,按照当地分3次追肥后进行灌溉,灌溉量为每次740~910 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,葵花于10月1日收货测产,其他管理方式同大田,田间作物及滴灌带布局见图1。

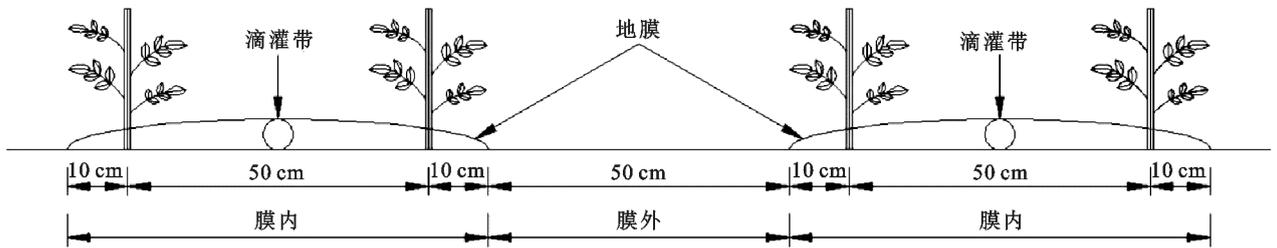


图1 田间作物及滴灌带布局

#### 1.4 样品采集与测定方法

试验于2017年9月至2018年9月进行土样采集,用土钻按照“多点混合”“随机取样”的原则采集膜上分别取0—5,5—15,15—30,30—50,50—70 cm 土层土样,混合土样质量达1 kg左右带回实验室备用,剔除异物进行风干、研磨、过筛、理化性质及相关指标的测定。土壤pH、盐分的测定:酸度计法(STARTER2100)测定土壤pH,用残渣烘干法测定全盐量,碱解扩散法测定碱解氮含量,0.50 mol/L NaHCO<sub>3</sub>法测定速效磷含量,1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc浸提—火焰光度法测定土壤速效钾含量,重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质含量,EDTA容量法测定Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量,火焰光度法测定Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>的含量,硝酸银滴定法测定Cl<sup>-</sup>的含量,EDTA间接络合滴定法测SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的含量,双指示剂—中和滴定法测定CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量。交换性采用乙酸铵—氢氧化铵—火焰光度法;碱化度可用交换性钠占阳离子交换量的百分比计算,具体方法参考文献[12]。

#### 1.5 数据处理

利用Microsoft Excel软件对数据进行计算汇总处理及绘图;用SPSS 17.0软件进行方差显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同灌溉模式及改良措施对土壤pH的影响

土壤pH可以综合反映土壤其他化学性质,其与土壤微生物活性、各种物质的转化以及土壤保肥保水的能力等有关<sup>[13]</sup>。由图2可知,随着土层深度的加深,各处理pH总体呈逐渐增加的趋势。黄灌模式下,与CK相比SL与SF处理降低了0—30 cm 土层pH,5—15 cm 土层pH下降最多,分别降低6.90%,7.60%。随着土层的加深,各处理与CK之间差异显著性逐渐减小( $P < 0.05$ )。第2年,0—15 cm 土层SL与SF处理较CK分别显著下降了0.40,0.43,0.65,0.68( $P < 0.05$ )。综合2年数据,黄灌下SL与

SF处理对0—30 cm 土层pH有明显的改良效果,整体趋势SF>SL>CK,SF处理随着改良时间的延长pH持续降低,而SL处理pH略有上升。滴灌模式第1年处理与CK相比,各处理0—15 cm 土层pH显著低于CK,SF处理下降幅度较大,0—15 cm 土层SL与SF处理较CK分别下降了2.80%,5.90%,30%,2.90%,15—70 cm 土层SF处理pH高于SL处理,各处理与CK无差异且随着土层深度的增加处理之间差异不显著( $P < 0.05$ )。第2年,随着改良时间的延长,改良效果明显,0—30 cm 土层2种处理pH持续降低,SF处理下pH最小,与CK差异明显。50—70 cm 土层,处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。综合2年滴灌数据,施加石膏+有机肥和秸秆深埋对改良土壤0—15 cm 土层pH效果显著,SF处理随着改良时间的延长,改良深度也会增加。但随着土层深度增加,2种处理之间差异显著性降低。对比2年不同灌溉模式,黄灌模式各处理的0—30 cm 土层pH低于滴灌,滴灌模式0—70 cm 土层pH随改良时间的延长改良深度增加,黄灌不明显。

### 2.2 不同灌溉模式2年内各处理对土壤碱化度的影响

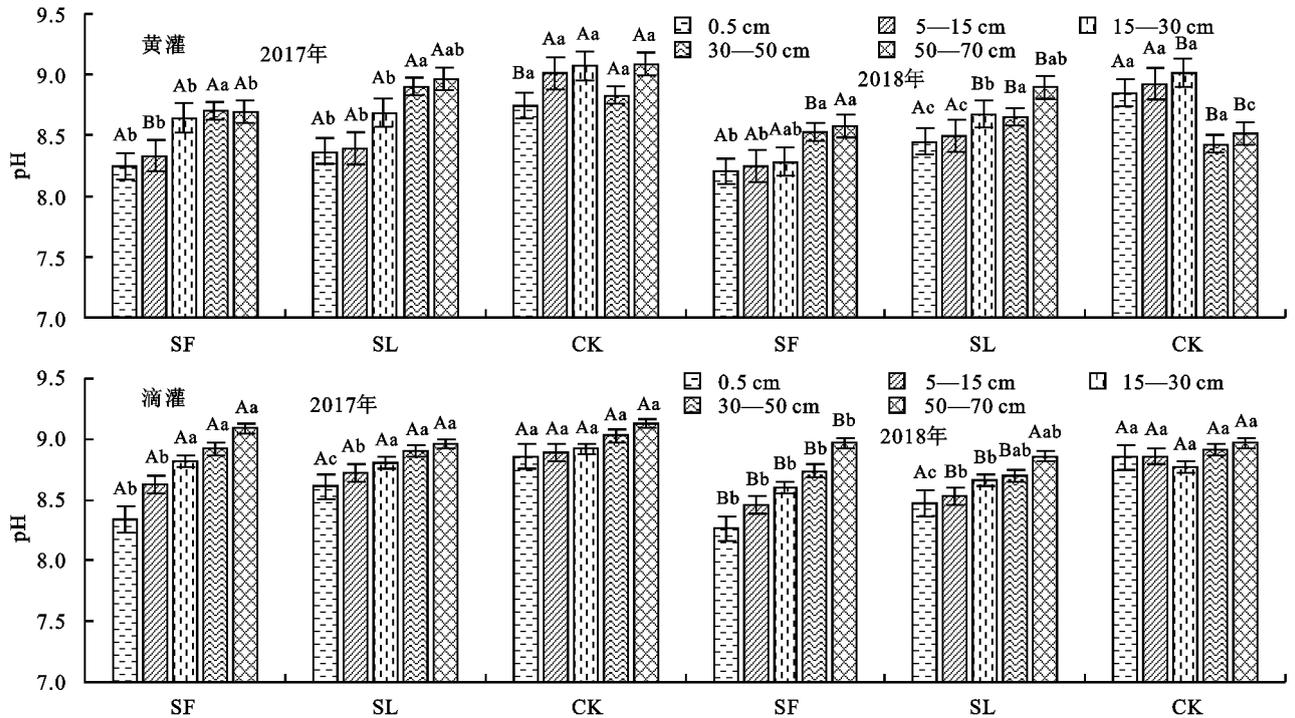
碱化度的高低直接反映改良效果的好坏。由图3可知,2种灌溉模式CK碱化度2年维持在一个较高的水平,无明显差异。滴灌模式第1年,SL与SF处理碱化度较CK显著下降( $P < 0.05$ ),SL处理碱化度降低29%,SF处理降低了33%,降幅最大。第2年,2种处理下碱化度进一步降低,由重度碱化土(20%~30%)改良为中度碱化土(10%~20%)。黄灌下SL与SF处理连续2年与CK差异显著( $P < 0.05$ ),第2年SF处理碱化度为18.59%。综合不同灌溉模式2年结果分析,SL与SF处理显著降低土壤碱化度( $P < 0.05$ ),且降低幅度随改良时间的延长而增大,滴灌模式更有利于碱化度的降低。

### 2.3 不同灌溉模式及改良措施对土壤盐分含量的影响

#### 2.3.1 滴灌模式2年土壤盐分含量的变化 试验地

地下水位较高,  $\text{Na}^+$  等离子含量较多且伴随着不断反复积盐和脱盐的过程。滴灌模式 2 年不同改良措施下的剖面土壤盐分含量(图 4); 第 1 年, 0—70 cm 土层 SL 处理显著降低土壤盐分含量, 平均含量较 CK 下降 22.70%, 方差分析表明, 随着改良时间的延长;

第 2 年含盐量持续降低。SF 处理第 1 年在 0—15 cm 土层较 CK 降低幅度较小, 与 CK 无明显差异, 第 2 年, 0—30 cm 土层含盐量进一步降低, 差异显著( $P < 0.05$ ), 表明随改良时间的延长, SF 处理能有效降低土壤盐分, 30—70 cm 土层规律不明显。



注: 不同小写字母表示处理与对照差异显著( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示处理 2 年之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图 2 不同灌溉方式 2 年各处理土壤 pH 变化

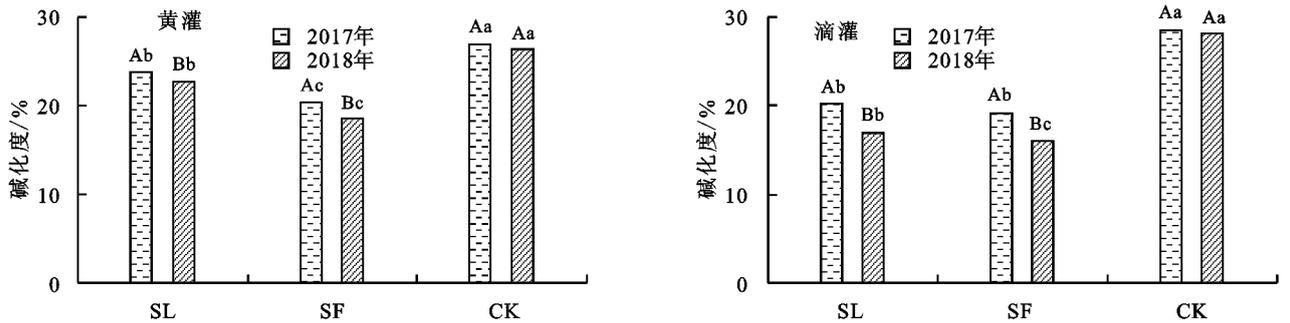


图 3 不同灌溉方式 2 年各处理土壤碱化度变化

2.3.2 黄灌模式 2 年土壤盐分含量的变化 由图 4 可知, 黄灌模式 2 年内 SL 处理均显著降低 0—70 cm 土层土壤盐分( $P < 0.05$ ), 与 CK 相比平均含量降低范围在 13.50%~16.90%。2 年内 SL 处理 0—30 cm 土层土壤盐分下降幅度较小, SF 处理在 0—15 cm 土层对降低土壤盐分随改良时间延长而达到显著差异( $P < 0.05$ )。2 年不同灌溉模式相比, SL 与 SF 处理均能降低 0—50 cm 土层盐分含量, 有明显的抑盐效果, 整体来看, SL 处理效果要优于 SF 处理。秸秆深埋在滴灌条件下更有利于 0—30 cm 土壤盐分的降低, 石膏+有机肥降低 0—15 cm 土层盐分含量会随着改良时间延长效果显著。

## 2.4 不同灌溉模式及改良措施对土壤盐基离子含量的影响

2.4.1 黄灌模式土壤盐基离子含量的变化 由表 1 可知, 与 CK 相比, SL 与 SF 处理 0—15 cm 土层  $\text{Na}^+$  含量显著降低, 且随着改良时间的增加  $\text{Na}^+$  含量进一步降低, 处理 2 年差异显著( $P < 0.05$ )。SF 处理下  $\text{Na}^+$  降低幅度更大, 2 年内分别降低了 15%, 23.30%。由于土壤表层  $\text{Na}^+$  被代换和被阻隔在水分的淋洗向深层土壤移动, 15—30 cm 土层各处理与 CK 无显著差异( $P < 0.05$ ), 而 30—50 cm 土层  $\text{Na}^+$  含量有所增加; 第 1 年随着石膏有机肥的施入, SF 处理与 CK 相比显著增加了 0—15 cm 土层  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量( $P < 0.05$ ), 第 2 年, 二者的含量在 0—30 cm 土层进一步

增加,2年内SL处理0—30 cm土层Ca<sup>2+</sup>及SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量明显降低,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在土壤中不易随灌溉水移动,故2年CK无明显变化;SL处理2年内Mg<sup>2+</sup>含量在0—50 cm土层有增加的趋势。2年内与CK相比SL处理Cl<sup>-</sup>含量在剖面上整体显著小于CK(P<0.05),

0—15 cm土层Cl<sup>-</sup>含量分别降低24.30%,40.60%,随着改良时间的延长,SL与SF处理在15—30 cm土层中Cl<sup>-</sup>含量逐渐增加。与CK相比,第2年2种处理0—15 cm土层HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>显著降低(P<0.05),2年内HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量有逐渐降低的趋势。

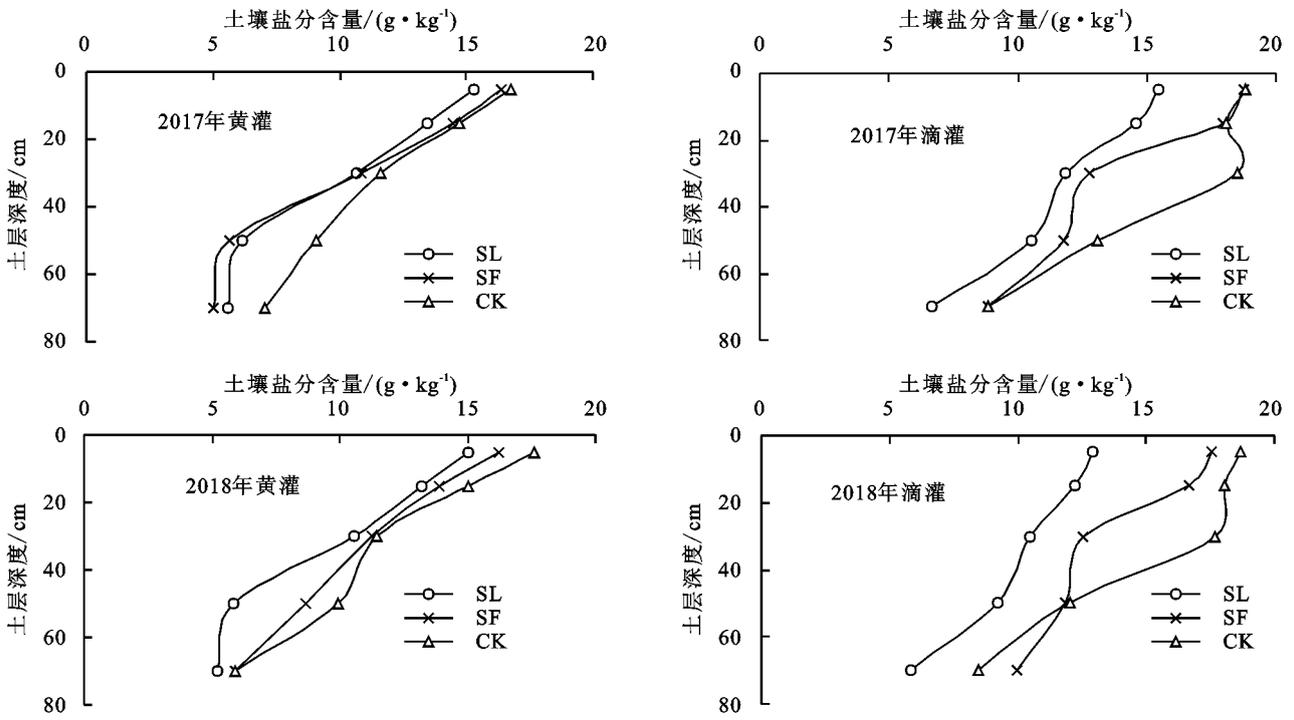


图 4 不同灌溉方式 2 年各处理土壤含盐量的变化

表 1 黄灌下各处理对土壤盐基离子的影响

单位:cmol/kg

处理	土层深度/cm	Na <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
		2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年
JGSM	0—15	7.65±0.07Ab	7.40±0.07Bb	1.88±0.05Ac	1.78±0.04Bc	2.47±0.06Bc	3.06±0.05Aa	0.42±0.03Aa	0.34±0.03Ab	7.64±0.10Bb	7.83±0.05Ac	1.50±0.06Bb	1.60±0.06Ab
	15—30	5.48±0.03Aa	5.41±0.06Aa	0.72±0.07Ab	0.78±0.05Ac	1.43±0.09Bc	2.82±0.08Aa	0.39±0.01Aa	0.35±0.01Ba	6.23±0.21Bc	6.73±0.03Ab	1.69±0.10Bb	1.71±0.06Ab
	30—50	2.85±0.06Aa	2.87±0.11Ab	0.62±0.04Ba	1.03±0.11Aa	0.73±0.12Bc	1.82±0.16Aa	0.37±0.05Aa	0.35±0.02Aa	4.95±0.18Bb	5.61±0.10Ab	0.98±0.04Ab	0.75±0.13Bb
S+Y	0—15	6.95±0.08Ac	6.32±0.14Bc	3.51±0.15Aa	3.64±0.09Aa	3.94±0.12Aa	3.24±0.09Ba	0.37±0.04Aa	0.34±0.01Ab	9.40±0.11Ba	10.94±0.04Aa	1.94±0.13Ba	2.63±0.05Aa
	15—30	5.07±0.02Bb	5.90±0.18Aa	2.48±0.02Ba	2.90±0.07Aa	2.26±0.06Bb	2.68±0.09Aab	0.38±0.04Aa	0.36±0.03Aa	7.90±0.10Ba	8.22±0.12Aa	2.07±0.03Ba	2.25±0.05Aa
	30—50	2.58±0.07Ba	2.93±0.08Ab	1.02±0.13Ba	1.43±0.12Aa	2.07±0.08Ba	2.16±0.06Aa	0.42±0.05Aa	0.40±0.03Aa	6.28±0.06Aa	7.62±0.08Aa	2.05±0.09Aa	2.00±0.12Aa
CK	0—15	8.16±0.08Aa	8.23±0.08Aa	2.85±0.13Ab	2.63±0.07Bb	3.00±0.11Ab	2.62±0.05Bb	0.51±0.02Ba	0.59±0.01Aa	7.94±0.20Bb	8.31±0.09Ab	1.98±0.03Ba	2.69±0.06Aa
	15—30	5.57±0.13Ba	5.70±0.17Aa	2.33±0.08Aa	2.27±0.03Ab	2.70±0.06Aa	2.41±0.06Bb	0.42±0.02Aa	0.39±0.04Aa	6.94±0.06Ab	6.97±0.03Ab	2.15±0.10Aa	1.81±0.07Bb
	30—50	2.14±0.06Ab	1.91±0.09Ba	1.01±0.20Aa	0.53±0.02Bb	1.50±0.02Bb	2.10±0.08Aa	0.38±0.04Aa	0.36±0.03Aa	3.85±0.17Bc	4.22±0.11Ac	2.19±0.01Aa	1.61±0.09Ba

注:表中数据形式为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理与对照差异显著(P<0.05);同列不同大写字母表示处理2年差异显著(P<0.05)。下同。

2.4.2 滴灌模式土壤盐基离子含量的变化 由表 2 可知,滴灌模式与CK相比2年内SF处理能有效降低剖面0—50 cm土层的Na<sup>+</sup>含量,平均含量分别下降24.70%,25.80%,在滴灌淋洗作用下,第2年0—15 cm土层Na<sup>+</sup>含量持续降低,15—50 cm土层Na<sup>+</sup>含量显著升高(P<0.05)。SL处理第1年Na<sup>+</sup>的含量与CK相比下降了11%,第2年Na<sup>+</sup>含量在整体剖面0—50 cm土层显著降低(P<0.05)。2年内SF处理0—15 cm土层下Na<sup>+</sup>含量降低幅度大于SL处理。SF处理SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Ca<sup>2+</sup>含量显著高于SL处理与

CK(P<0.05),随着改良时间延长,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量持续增加,Ca<sup>2+</sup>在0—15 cm土层明显增高15—50 cm土层呈降低趋势,SL处理与CK相比Ca<sup>2+</sup>含量在15—30 cm土层下显著提高(P<0.05),其他土层2年内无明显变化,只是调整了Ca<sup>2+</sup>在土壤剖面上的分布。SL处理2年内Mg<sup>2+</sup>与CK相比无明显变化,SF处理显著提高了15—30 cm土层Mg<sup>2+</sup>的含量。SL与SF处理Cl<sup>-</sup>含量2年内有明显减少的趋势,和CK相比2年SL处理0—50 cm土层Cl<sup>-</sup>含量降低,0—15 cm土层下降明显,降低31.70%;SF处理15—50

cm 土层  $\text{Cl}^-$  含量显著增加 ( $P < 0.05$ ), 改良第 1 年  $\text{HCO}_3^-$  与 CK 无明显差异, 第 2 年 SL 与 SF 处理有

效降低了 0—30 cm 土层下的  $\text{HCO}_3^-$  的含量, 其平均含量分别下降到 0.32, 0.32 cmol/kg。

表 2 滴灌下各处理对土壤盐基离子的影响

单位: cmol/kg

处理	土层深度/cm	$\text{Na}^+$		$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Mg}^{2+}$		$\text{HCO}_3^-$		$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
		2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年	2017年	2018年
JGSM	0—15	7.02±0.06Ab	6.52±0.12Bb	2.75±0.06Ab	2.88±0.12Ab	2.44±0.11Aa	2.43±0.01Aa	0.36±0.08Aa	0.31±0.02Ab	7.27±0.06Bb	7.43±0.12Ab	1.48±0.07Ab	1.26±0.04Bb
	15—30	5.68±0.05Aa	5.42±0.01Bb	2.35±0.09Ab	2.34±0.01Ab	1.55±0.02Ab	1.62±0.04Ab	0.38±0.02Aa	0.32±0.01Bb	5.88±0.17Ab	6.01±0.06Ab	1.60±0.06Ab	1.38±0.05Bc
	30—50	2.55±0.12Ab	2.25±0.07Bb	1.04±0.07Ab	0.85±0.04Bb	1.28±0.07Aa	0.88±0.12Bb	0.39±0.02Aa	0.33±0.03Aa	4.65±0.23Bb	4.85±0.15Ab	0.23±0.04Bc	1.14±0.06Ab
S+Y	0—15	6.10±0.14Ac	5.06±0.02Bc	4.03±0.08Ba	4.22±0.11Aa	2.77±0.10Aa	2.85±0.15Aa	0.36±0.01Aa	0.31±0.01Bb	8.76±0.18Ba	9.52±0.14Aa	2.16±0.06Aa	2.10±0.04Ba
	15—30	4.99±0.09Bb	5.46±0.04Ab	3.86±0.02Aa	3.69±0.01Ba	2.40±0.11Aa	2.46±0.05Aa	0.37±0.03Aa	0.33±0.02Bb	7.66±0.14Ba	8.16±0.04Aa	2.38±0.06Aa	2.25±0.06Ba
	30—50	2.13±0.09Bb	2.28±0.06Ab	1.63±0.14Aa	1.70±0.11Aa	1.57±0.06Aa	1.53±0.03Aa	0.34±0.15Aa	0.30±0.02Aa	5.62±0.21Ba	6.32±0.08Aa	1.66±0.11Ba	1.95±0.07Aa
CK	0—15	7.87±0.21Aa	7.92±0.06Aa	2.48±0.08Ab	2.55±0.125Ab	2.64±0.13Aa	2.59±0.06Aa	0.47±0.08Aa	0.49±0.02Aa	7.66±0.23Ab	7.82±0.05Ab	2.09±0.07Aa	1.92±0.08Ba
	15—30	5.90±0.07Aa	5.72±0.03Ba	1.88±0.08Ac	1.79±0.01Ac	1.22±0.10Ab	1.28±0.05Ac	0.39±0.045Aa	0.41±0.02Aa	5.78±0.16Ab	5.93±0.07Ab	1.86±0.12Ab	1.65±0.06Ab
	30—50	3.78±0.08Aa	3.61±0.05Aa	0.86±0.02Ab	0.94±0.06Ab	1.16±0.15Ba	1.47±0.03Aa	0.36±0.03Aa	0.38±0.02Aa	4.62±0.04Bb	4.97±0.08Ab	1.19±0.10Ab	1.14±0.06Ab

### 3 讨论

#### 3.1 不同措施对 pH 和碱化度的影响

本试验探究不同灌溉模式下秸秆深埋和施加石膏+有机肥 2 种措施下对重度盐渍土土壤改良效果的对比试验。pH 高低能直接反映改良效果是否明显, 而碱化度是盐渍土利用和改良过程中反映土壤质量变化的重要指标。本试验研究表明, 不同改良措施下 pH 较 CK 均显著降低, 但主要影响范围在 0—15 cm, 碱化度降低比例较大, 最大下降幅度为 43%, 不同改良措施石膏+有机肥改良效果最佳, 且具有一定的长效性。原因是施入的脱硫石膏增加了土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  发生交换反应,  $\text{Na}^+$  随水进入土壤下层导致土壤碱化度的降低, 土壤 pH 主要受  $\text{HCO}_3^-$  的影响, 施加进去的石膏释放的  $\text{Ca}^{2+}$  会与  $\text{HCO}_3^-$  反应, 从而降低土壤 pH, 而秸秆深埋有效抑制了盐分离子向表层的聚集, 可能是粉碎的秸秆产生了一定的酸性物质, 对碱性离子起到一定的中和作用, 这与前人<sup>[14-15]</sup>的研究结果较一致。黄灌 pH 最大降低 0.68, 滴灌 pH 最大降低 0.58, 不同的灌溉模式对改良措施下 pH 存在一定的差异, 但二者相差不大, 基本保持在一个水平, 探其原因可能是因为漫灌与滴灌相比, 其水分入渗及蒸发速率都有一定的不同, 进而影响改良剂的作用效果, 但本试验条件无法再深入探究, 但仍可得出漫灌模式有利于改良措施下 pH 的降低。

#### 3.2 不同措施对盐分的影响

盐碱土壤含盐量高是由于盐碱土壤颗粒中附着大量的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ , 使得土壤颗粒上吸附大量水分子, 从而造成了土壤黏重、含水量多、透气性差, 影响了作物的生长环境<sup>[16]</sup>。试验土壤盐剖面研究表明, 在不同改良措施下, 剖面土壤盐分含量表现为随着土层深度的增加, 含盐量下降的趋势, 试验 2 年不同灌溉模式秸秆深埋显著降低, 整个剖面土层土壤盐分,

0—15 cm 土层平均含量最大降低 33%, 随着改良时间延长含盐量呈持续降低趋势, 表明秸秆深埋能有效防止反盐期盐分表层积聚。这是因为秸秆深埋可以形成有效的“隔盐层”, 破坏了土体毛细管的连续性, 防止盐分向上运移, 有利于上层盐分的淋洗达到了抑盐控盐效果。滴灌因其有着高频灌水的优点, 为作物提供适宜的水盐环境, 相比漫灌秸秆深埋在滴灌条件下更有利于 0—30 cm 土层土壤盐分的降低, 郑晓辉等<sup>[17]</sup>研究表明, 滴灌可形成有效的低盐区, 漫灌压盐效果优于滴灌, 本试验与其结果不相一致, 根据“盐随水动”的原则, 分析可能是滴灌供水形成的一个点源, 而漫灌供水是面源, 漫灌下水分下渗上限到表层, 滴灌可形成一个“淡化区”其下渗能力优于漫灌, 本试验中滴灌下 30—70 cm 土层盐分含量明显高于黄灌, 表明盐分会随着水逐渐向深层移动, 在深层聚集。有研究<sup>[18-20]</sup>表明, 施用脱硫石膏处理较 CK 土壤的全盐含量下降 28.32%, 秸秆深埋能有效降低土壤含盐量, 施用有机肥的设施次生盐渍土土壤盐分离子总量可降低 15% 以上, 滨海盐渍土可降低 10% 以上。本试验在不同灌溉模式下对石膏+有机肥降低土壤 0—15 cm 土层盐分第 1 年无明显差异, 第 2 年含盐量显著降低, 分析其原因石膏本身就是一种盐类而有机肥可能带有一定的盐分离子故第 1 年施入进去可能会增加盐分的积累, 但随着改良时间的延长二者结合增加土壤的带换量, 减少表土含盐量, 加大了对盐分的控制效果。

#### 3.3 不同措施对盐基离子的影响

盐渍土改良的效果与改良后土壤中可溶性离子有直接关系,  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  等离子降低是改良盐渍土的根本所在; 因为土壤  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  等是土壤理化性质恶化的主要原因,  $\text{Na}^+$  过高使土壤团粒分散造成土壤结构性破坏, 通透性降低, 毛细水上升困难<sup>[21]</sup>。对土壤剖面盐基离子分析表明, 漫灌与滴灌较大的灌溉定额及结合秸秆深埋和石膏+有机肥

对  $\text{Na}^+$  有明显的影响,能有效降低 0—15 cm 土层的  $\text{Na}^+$  含量,这与前人<sup>[22-23]</sup>研究相一致。从降低比例来看,石膏+有机肥最大降低幅度达 36.2%,滴灌因其有着点源扩散、频率高的优点,整体剖面上看滴灌更有利于土壤  $\text{Na}^+$  降低,有研究<sup>[24]</sup>指出,脱硫石膏的施入能增加  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量,本试验印证了这一点,而在秸秆深埋下  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  明显降低, $\text{Mg}^{2+}$  在土体中的,变异性较大。总体来说,与 CK 相比石膏+有机肥增加了剖面土层  $\text{Mg}^{2+}$  含量,秸秆深埋  $\text{Mg}^{2+}$  总体含量有所降低。 $\text{Cl}^-$  带负电不易发生化学反应,也不易被胶体吸附,易随水分流动,滴灌模式下与 CK 相比 2 年内石膏+有机肥  $\text{Cl}^-$  含量明显增加,这与刘娟等<sup>[25]</sup>研究结果不一致,分析可能是有机肥中含有一定的  $\text{Cl}^-$  随水分的移动进入土壤,提高了  $\text{Cl}^-$  含量,秸秆深埋整体降低了土壤剖面  $\text{Cl}^-$  的含量。 $\text{HCO}_3^-$  改良第 1 年 CK 与处理无明显差异,秸秆深埋和石膏+有机肥对降低 0—15 cm 土层  $\text{HCO}_3^-$  含量在第 2 年达到显著效果。根据试验区情况,采用的石膏、有机肥、秸秆具有低成本,环保等特点,可有效地改善土壤性状,促进作物生长。但本试验只针对作物收获后改良效果进行分析,在考虑作物生长周期及环境因素等问题的基础上,未来应继续加强改良长效性探究及对土壤水盐动态变化影响。

## 4 结论

(1) 秸秆深埋和石膏+有机肥有效降低土壤碱化度对 0—15 cm 土层 pH 降低效果最显著;且随改良时间的增加,pH 和碱化度会持续降低,石膏+有机肥改良效果优于秸秆深埋,不同灌溉模式,滴灌下更有利于碱化度降低;pH 表现为黄灌<滴灌。

(2) 秸秆深埋可有效降低 0—30 cm 土层的土壤盐分含量,石膏+有机肥降低含盐量第 1 年不明显,第 2 年平均含盐量滴灌下降 14%,黄灌下降 6%,效果显著;数据分析表明,不同灌溉模式下 SL 与 SF 处理较 CK 对降低 0—30 cm 土层盐分含量均在第 2 年达显著,随着改良时间的延长,滴灌配合改良剂效果优于漫灌,并具有一定的长效性。2 种改良措施都能降低 0—15 cm 土层  $\text{Na}^+$  的含量且在滴灌下更有利于  $\text{Na}^+$  的降低,改良效果石膏+有机肥>秸秆深埋,石膏+有机肥施入会增加 0—70 cm 土层  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Cl}^-$  含量,总体趋势 SF>CK>SL。不同改良措施 0—15 cm  $\text{HCO}_3^-$  降低会随改良时间延长而显著降低。

(3) 综上秸秆深埋和石膏+有机肥处理对改良重度盐渍土都有较明显的作用,尤其是对 0—15 cm 土层有显著的作用,有效降低了土壤耕层的盐度、碱化度和 pH,改善了土壤结构,更适于重度盐渍土上作物的生长。

处理之间相比,石膏+有机肥降低 pH 及碱化度效果更好,秸秆深埋降低含盐量幅度更大,总体来说,滴灌条件下更有利于发挥改良剂的作用。滴灌条件下施加石膏+有机肥更适合推广应用于重度盐渍土改良。

### 参考文献:

- [1] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.
- [2] Setia R, Gottschalk P, Smith P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks [J].*Science Total Environment*,2013,465:267-272.
- [3] 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.
- [4] 张密密,陈诚,刘广明,等.适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J].农业工程学报,2014,30(10):91-98.
- [5] Isidoro D, Grattan S. Predicting soil salinity in response to different irrigation practices, soil types and rainfall scenarios [J]. *Irrigation Science*,2011,29:197-211.
- [6] 杨军,孙兆军,罗成科,等.水盐调控措施改良龟裂碱土提高油菜产量[J].农业工程学报,2015,31(18):121-128.
- [7] 毛玉梅,李小平.烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J].中国环境科学,2016,36(1):225-231.
- [8] 孙兆军,赵秀海,王静,等.脱硫石膏改良龟裂碱土对枸杞根际土壤理化性质及根系生长的影响[J].林业科学研究,2012,25(1):107-110.
- [9] 罗佳,盛建东,王永旭,等.不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):48-53.
- [10] Oumi Y, Albacete A, Cantero E, et al. Influence of municipal solid waste (MSW) compost on hormonal status and biomass partitioning in two forage species growing under saline soil conditions [J]. *Ecological Engineering*,2014,64(3):142-150.
- [11] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等.膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J].农业工程学报,2014,30(4):90-99.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:189-196.
- [13] 毛玉东,梁社往,何忠俊,等.土壤 pH 对滇重楼生长、养分含量和总皂甙含量的影响[J].西南农业学报,2011,24(3):985-989.
- [14] 南江宽,陈效民,王晓洋,等.石膏与肥料配施对滨海盐土降盐抑碱的效果研究[J].南京农业大学学报,2014,37(4):103-108.
- [15] 韩剑宏,李艳伟,张连科,等.生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J].环境工程学报,2017,11(9):5291-5297.

- 集镉的效应[J].生态学报,2017,37(14):4656-4662.
- [8] 王睿彤,陆兆华,孙景宽,等.土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土的改良效应[J].水土保持学报,2012,26(4):239-244.
- [9] 刘易,冯耀祖,黄建,等.微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):146-152.
- [10] 张密密,陈诚,刘广明,等.适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J].农业工程学报,2014,30(10):91-98.
- [11] 何瑞成,吴景贵.有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J].土壤学报,2018,55(3):774-782.
- [12] 孟凡荣,窦森,尹显宝,等.施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(1):122-128.
- [13] Bruun S, Yoshida H, Nielsen M P, et al. Estimation of long-term environmental inventory factors associated with land application of sewage sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 440-450.
- [14] 马锋锋,赵保卫,刁静茹,等.磁性生物炭对水体中对硝基苯酚的吸附特性[J].中国环境科学,2019,39(1):170-178.
- [15] 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.
- [16] 沈婧丽,王彬,许兴.脱硫石膏改良盐碱地研究进展[J].农业科学研究,2016,37(1):65-69.
- [17] 高利华.滴灌条件下水炭耦合对土壤节水保肥和固碳减排综合效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:25-76.
- [19] 李倩倩,许晨阳,耿增超,等.生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J].环境科学,2019,40(7):1-14.
- [20] 张雯,耿增超,陈心想,等.生物质炭对盐土改良效应研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):73-77,105.
- [21] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [22] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendment on the quality of a typical midwestern agricultural soil [J]. Geoderma: An International Journal of Soil Science, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [23] 沈婧丽.脱硫石膏改良盐碱地不同技术集成模式研究[D].银川:宁夏大学,2016.
- [24] 于寒青,孙楠,吕家珑,等.红壤地区三种母质土壤熟化过程中有机质的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):92-98.
- [25] 高利华,屈忠义.膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J].土壤,2017,49(3):614-620.
- [26] 李谟志,徐彦虎,林启美,等.燕麦与脱硫石膏对内蒙古河套地区盐渍化土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2014,30(23):171-176.
- [27] 唐珖,张强,王斌,等.脱硫石膏改良重度苏打盐化土的环境效应[J].水土保持学报,2017,31(2):317-321.
- (上接第 315 页)
- [16] 沈婧丽,王彬,田小萍,等.不同改良模式对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J].江苏农业学报,2016,32(2):338-344.
- [17] 郑晓辉,巴特尔·巴克,李宏,等.不同灌水方式下干旱区盐碱地土壤水盐运移特征分析[J].东北农业大学学报,2011,42(5):95-99,148-149.
- [18] 刘师敏,李培贵,张振希,等.盐碱地施用脱硫废弃物对甜菜种植的影响[J].安徽农业科学,2013,41(3):1085-1087.
- [19] 邵孝候,张宇杰,常婷婷,等.生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):153-160.
- [20] 李芙蓉,杨劲松,吴亚坤,等.不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响[J].土壤,2013,45(6):1101-1107.
- [21] 范富,徐寿军,宋桂云,等.玉米秸秆造夹层处理对西辽河地区盐碱地改良效应研究[J].土壤通报,2012,43(3):696-701.
- [22] 王旭,何俊,孙兆军,等.脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子影响研究[J].土壤通报,2017,48(5):1210-1217.
- [23] 卢闯.玉米秸秆隔层对土壤溶液盐浓度与离子运动的影响[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [24] 陈建,王文芬.滴灌条件下脱硫石膏对甘肃盐碱地的改良效果研究[J].节水灌溉,2018(5):35-38.
- [25] 刘娟,张凤华,李小东,等.滴灌条件下脱硫石膏对盐碱土改良效果及安全性的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):87-93.