

## 秸秆及其配施有机物料对黄灌区盐碱土淋洗效果的影响

尹广生, 李玮, 彭钰梅, 陈冲, 商建英, 王祥

### 引用本文:

尹广生, 李玮, 彭钰梅, 陈冲, 商建英, 王祥. 秸秆及其配施有机物料对黄灌区盐碱土淋洗效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 339-350.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0266>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响

杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 邓照亮, 李真, 王世梅

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2080-2085 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0379>

#### 玉米浆及配合其他有机物料对苏打碱土改良效果及腐殖质特性变化

段宏美, 窦森, 王德辉, 郑爽, 李双翼, 张一枫, 白月

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2159-2166 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0315>

#### 不同盐碱化土壤对 $\text{NH}_4^+$ 吸附特性研究

徐祎璠, 孙方园, 郭亚馨, 马秀兰, 王玉军

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2345-2353 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0445>

#### 氢氧化镁铝改良滨海盐碱土机理与效果研究

田露, 赵林, 杨永奎, 乔治

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2220-2225 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1738>

#### 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究

金梦野, 黄娟, 侯斌, 黄占斌

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 118-124 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0880>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尹广生, 李玮, 彭钰梅, 等. 秸秆及其配施有机物料对黄灌区盐碱土淋洗效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 339–350.

YIN G S, LI W, PENG Y M, et al. Effects of straw and its application on different organic materials on the leaching effect of saline-alkali soils in an irrigation area in the South bank of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 339–350.



开放科学 OSID

# 秸秆及其配施有机物料对黄灌区盐碱土淋洗效果的影响

尹广生<sup>1,2</sup>, 李玮<sup>1,2</sup>, 彭钰梅<sup>1,2</sup>, 陈冲<sup>1,2</sup>, 商建英<sup>1,2</sup>, 王祥<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 为了分析比较玉米秸秆及其配施不同有机物料对盐碱土壤淋洗过程中盐分和溶解性有机物的影响, 以黄河南岸灌区中度和重度两种盐碱土壤为研究对象, 分别设置对照(CK)、3% 玉米秸秆(W1)、2% 玉米秸秆配施 1% 牛粪(W2)和 2% 玉米秸秆配施 1% 生物炭(W3)共 4 个处理, 通过测定淋洗液的可溶性盐和溶解性有机碳(DOC)含量、淋洗前后土壤电导率(EC)和盐基离子, 探究淋洗过程中不同有机物料添加下土壤盐分和有机物分解过程的变化。结果表明: 秸秆及其配施不同有机物料均显著降低了两种盐碱土淋洗后土壤的 EC 和可溶性盐离子含量。与淋洗前相比, W1、W2 和 W3 处理下, 中度盐碱土的脱盐率分别为 65.02%、67.22% 和 66.21%, 重度盐碱土分别为 73.85%、66.14% 和 69.55%。W1、W2 和 W3 处理下, 中度盐碱土中可溶性 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的降幅范围分别为 48.38%~69.32%、70.89%~75.86% 和 73.00%~74.45%, 重度盐碱土中可溶性 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 降幅范围分别为 14.86%~23.39%、70.98%~85.84%、86.63%~92.39% 和 93.72%~95.42%。有机物料的输入会增加两种盐碱土的 DOC 含量, 但不同处理在两种盐碱土中腐殖化程度表现不同。中度盐碱土中, 不同物料淋洗液中溶解性有机物的特定紫外吸光度(SUVA<sub>254</sub>)和光谱斜率比值(S<sub>R</sub>)在处理间均无显著差异, SUVA<sub>254</sub> 随淋洗次数增加而降低, 而 S<sub>R</sub> 均增大; 重度盐碱土中, 添加有机物料处理下溶解性有机物的 S<sub>R</sub> 均较小, 但 W1 处理的 SUVA<sub>254</sub> 低于 W2 和 W3 处理。秸秆配施不同有机物料均提高了土壤持水量, 中度盐碱土中以 W1 效果最好, 提高了 31.00%, 重度盐碱土中 W1、W2 分别提高了 76.46%、74.33%。综上, 在相同淋洗状态下, 外源有机物料的添加均不同程度地减少了两种盐碱土的可溶性盐基离子含量, 有效降低了土壤盐碱程度, 尤其是重度盐碱土。同时, 外源有机物料的添加也增加了土壤 DOC 的输入来源, 提高了土壤持水能力, 弥补了淋洗对盐碱化土壤造成的养分损失。在给定淋洗条件下, 中度盐碱土中 W2 处理的脱盐、降 Na<sup>+</sup> 效果最好, 重度盐碱土中以 W1 处理较好。

**关键词:** 玉米秸秆; 有机物料; 盐碱土; 配施; 土柱淋洗

中图分类号: S156.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)02-0339-12 doi:10.11654/jaes.2023-0266

## Effects of straw and its application on different organic materials on the leaching effect of saline-alkali soils in an irrigation area in the South bank of the Yellow River

YIN Guangsheng<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, PENG Yumei<sup>1,2</sup>, CHEN Chong<sup>1,2</sup>, SHANG Jianying<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1,2\*</sup>

(1. Faculty of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To analyze and compare the dynamic changes of salt and dissolved organic matter during the leaching of saline-alkali soils under the addition of different organic materials, control (CK), 3% corn stover (W1), 2% corn stover with 1% cow dung (W2), and 2% corn stover with 1% biochar (W3) were applied to moderate and severe saline-alkali soils in an irrigation area in the south bank of the Yellow River. Subsequently, the soluble salt and dissolved organic carbon (DOC) content of the eluent, soil electrical conductivity (EC) and salt-

收稿日期: 2023-04-07 录用日期: 2023-07-13

作者简介: 尹广生(1999—), 男, 硕士研究生, 从事盐碱地改良研究。E-mail: 1783212356@qq.com

\*通信作者: 王祥 E-mail: wangxiang@cau.edu.cn

基金项目: 内蒙古自治区科技兴蒙项目(2021EEDSCXSFQZD011)

Project supported: Inner Mongolia Autonomous Region Research Project(2021EEDSC-XSFQZD011)

based ions before and after leaching were analyzed, to explore the changes in soil salt and organic decomposition processes under the addition of different organic matter during the leaching process. The results showed that: the EC value and water-soluble salt ion content of the soil after the leaching of the two saline-alkali soils were significantly reduced by straw and its application on different organic materials. Compared with before leaching, under the treatment of W1, W2, and W3, the desalination rates of moderate saline-alkali soil were 65.02%, 67.22%, and 66.21%, and the heavily saline-alkali soil were 73.85%, 66.14% and 69.55%, respectively. Under the treatment of W1, W2, and W3, the reductions of water-soluble  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{Mg}^{2+}$  in moderately saline-alkali soil ranged from 48.38%–69.32%, 70.89%–75.86%, and 73.00%–74.45%, respectively, and the reduction ranges of water-soluble  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{Mg}^{2+}$  in heavily saline-alkali soil were 14.86%–23.39%, 70.98%–85.84%, 86.63%–92.39%, and 93.72%–95.42%, respectively. The input of organic materials increased the content of DOC in the two saline-alkali soils, but the degree of humification in the two saline-alkali soils was different under different treatments. In moderate saline-alkali soil, there were no significant differences between special UV absorbance of 254 nm ( $\text{SUVA}_{254}$ ) and spectra slope ( $S_R$ ) in eluents of different organic material treatment, and  $\text{SUVA}_{254}$  decreased with the increase in leaching frequency, while  $S_R$  increased. In severe saline-alkali soil,  $S_R$  of the dissolved organic matter under the treatment of added organic materials was low, but  $\text{SUVA}_{254}$  of the treatment with 3% straw was lower than that of the treatments with cow dung or biochar. The application of different organic materials to straw increased the soil's water holding capacity. W1 was the best in moderate saline-alkali soil, with an increase of 31.00%; W1 and W2 in severe saline-alkali soil increased by 76.46% and 74.33%. In summary, the addition of exogenous organic materials in the same leaching condition reduced the soluble salt-based ion content of the two saline-alkali soils to varying degrees, and effectively reduced the salinity of the soil, especially the severe saline-alkali soil. Simultaneously, the addition of exogenous organic materials also increased the input source of soil DOC, improved the soil's water holding capacity, and made up for the nutrient loss caused by leaching on saline-alkali soils. Under the given leaching conditions, W2 in desalination and  $\text{Na}^+$  reduction was the best in moderate saline-alkali soil, while W1 was better in severe saline-alkali soil.

**Keywords:** corn stover; organic materials; saline-alkali soil; combine; soil column leaching

土壤盐碱化是影响土地生产力和农业可持续发展的全球性环境问题。我国盐碱化土壤总面积约为  $1.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>, 是保障 18 亿亩耕地红线、建设高标准农田体系的重要后备资源。黄河南岸灌区是内蒙古自治区的六大大型引黄灌区之一, 盛产小麦、玉米、大豆以及向日葵等作物, 是重要的粮食主产区。但由于灌区土壤母质含有较多的可溶性盐且地下水矿化度高, 气候干旱少雨、蒸发强烈、年温差大, 以及农业管理措施较为粗放, 该地区原生盐碱化和次生盐碱化危害严重<sup>[2-3]</sup>。在盐分离子胁迫下土壤理化性质和土壤结构会逐渐恶化、土壤质量下降<sup>[4]</sup>, 这严重制约了该地区农业健康发展。因此, 改善土壤盐碱化对于提高当地土地资源利用和作物产量具有重要作用。

目前, 盐碱化土壤的改良方法多样, 如物理改良、化学改良和生物调控等。但由于盐碱化土壤具有盐含量高、土粒分散、质地黏重、易板结以及有机质含量低等突出问题<sup>[5]</sup>, 单纯降低土壤盐分并不能改善已经被破坏的土壤性质。而作物秸秆、畜禽粪便以及生物炭等有机物料在调节土壤盐分的同时可以改善土壤肥力和结构, 因此被广泛用于盐碱土壤改良。Xie 等<sup>[6]</sup>的研究表明秸秆还田能改善盐碱土的物理结构和化学特性, 如促进团聚体的形成和稳定, 降低土壤盐碱度并改变土壤中盐基离子的分布。Xuan 等<sup>[7]</sup>通

过数字图像分析和三维研究发现玉米秸秆和牛粪的施用均降低了土壤容重, 提高了水稳性大团聚体含量, 显著改善了土壤连通性。而牛粪和秸秆的联合施用能显著提高土壤微生物数量<sup>[8]</sup>, 增加作物的水分利用效率<sup>[9]</sup>。王庆蒙<sup>[10]</sup>通过室内培养和大田试验发现, 与单施秸秆相比, 秸秆配施有机肥具有较好的土壤培肥效果, 能显著提高向日葵产量。生物炭由于其颗粒密度小、结构多孔、表面具有丰富的含氧官能团等特点, 能改善土壤结构和土壤水力特性<sup>[11]</sup>。添加玉米秸秆生物炭能提高钠盐碱土壤的阳离子交换容量, 增加土壤有机质和养分含量, 降低土壤 pH、盐分和  $\text{Na}^+$  含量<sup>[12]</sup>, 增强土壤的持续供氮能力<sup>[13]</sup>, 而且配施生物炭能促进作物秸秆的降解<sup>[14]</sup>。

秸秆、牛粪及生物炭等有机物料的应用是改善盐碱化土壤的重要措施。然而, 目前关于这 3 种有机物料的研究大多侧重于单一施入对盐碱土壤的改善效果, 已有的配施研究也主要关注对盐碱土壤的基础理化性质和作物产量的影响, 而鲜有探究秸秆及其配施对盐碱土壤淋洗过程的影响。本研究结合农业主要有机废弃物(玉米秸秆), 通过土柱模拟试验, 探究添加秸秆及配施不同有机物料(牛粪、生物炭)对两种盐碱化程度较重土壤的盐分、溶解性有机碳(DOC)含量及紫外特征的影响及其之间的差异, 以期为我国黄河

南岸灌区盐碱土治理和耕地可持续利用提供理论依据和指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

土壤样品分别采自内蒙古鄂尔多斯达拉特旗的树林召镇(40°29'N, 109°52'E)和展旦召苏木(40°30'N, 109°52'E)。该地区属于黄河南岸灌区,年均气温为-4.65~9.14℃,年降水量为35.86~506.15mm,年平均蒸发量为942~4138mm。采用五点取样法采集0~20cm土壤样品,土样于室内除去碎石子和枯枝落叶,风干后过2mm筛。土壤基本理化性质见表1,根据盐碱化程度分为中度盐碱土和重度盐碱土<sup>[15]</sup>。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils

基本性质 Basic property	中度盐碱土 Moderate saline-alkali soil	重度盐碱土 Severe saline-alkali soil
pH <sub>1:5</sub>	7.82	7.27
EC <sub>1:5</sub> /(mS·cm <sup>-1</sup> )	1.55	5.10
钠吸附比	4.25	11.20
可溶性盐含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	4.92	19.40
砂粒(2~0.05mm)/%	36.67	38.06
粉粒(0.05~0.002mm)/%	28.60	29.97
黏粒(<0.002mm)/%	34.73	31.97
有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	11.02	10.90

有机物料分别为玉米秸秆、牛粪以及玉米秸秆生物炭。玉米秸秆为北京市中国农业大学上庄实验站收获风干后的玉米秸秆;风干牛粪收集自山东省东营市垦利区垦利良种场;生物炭购买自南京勤丰众成生物质新材料有限公司,为玉米秸秆在450℃下无氧热解制成的非改性生物炭。供试物料基本性质见表2。

### 1.2 试验设计与过程

在综合已有试验研究土壤的盐碱化程度和玉米秸秆添加百分比的基础上<sup>[16-19]</sup>,分别设计了对照

(CK)、添加3%玉米秸秆(W1)、2%玉米秸秆配施1%牛粪(W2)以及2%玉米秸秆配施1%生物炭(W3)4种处理。各处理重复3次。

淋洗模拟试验使用高15cm、内径5cm的底部均匀带孔的有机玻璃管,管内壁涂抹一层凡士林以减少土柱的边壁效应,于底部铺2层定性滤纸(孔径80~120μm)和1层直径为6.35mm的玻璃珠,防止底部土壤流失并使液体均匀下渗。将供试土壤与过1mm筛的有机物按质量比混合均匀(秸秆和牛粪为粉末状,生物炭为颗粒状),按土壤容重约1.35g·cm<sup>-3</sup>分层填充土柱,每层装入土后用夯土器压实,然后刮平进行下一层土的填装,管中土壤质量为260g。于土柱上部铺一层玻璃珠和一层滤纸以防止加水时破坏土壤表层。

土柱模拟淋洗试验在室温(25±2)℃下进行。淋洗前,预培养一周使土壤和有机物充分融合,在中度盐碱土和重度盐碱土各处理中分别缓慢加入去离子水使其达到田间持水量,每天利用称取质量的方法维持土壤含水量。预培养结束后,模拟降雨过程,每天添加20g去离子水,收集土柱淋洗液,土柱停止渗出水流后(30min不再有水滴滴落为准),称量土柱质量并记录。模拟过程持续20d,每3d的淋洗液作为一次淋洗液样品。收集的淋洗液用离心管存于冰箱中待测。淋洗结束后测定土壤电导率(EC)和可溶性阳离子含量。

### 1.3 指标测定及方法

土壤EC(土水比为1:5)采用电导率仪(DDS-11A,仪电科学,中国)测定;可溶性盐总含量采用残渣烘干法测定;土壤有机碳和全氮采用碳氮元素分析仪(Flash2000,Thermo Fisher,美国)测定;DOC采用总有机碳分析仪(vario TOC,Elementar,德国)测定;可溶性K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>含量采用火焰光度法(FP640,上海精密,中国)测定;可溶性Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量采用原子吸收分光光度法(PinAAcle 900T,PerkinElmer,美国)测定。可溶性有机物质的紫外特性采用紫外分光光度计(TU-

表2 供试有机物料基本性质

Table 2 Physical and chemical properties of the experiment materials

有机物料 Organic material	pH <sub>1:10</sub>	EC/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全Na <sup>+</sup> Total sodium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全Ca <sup>2+</sup> Total calcium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全Mg <sup>2+</sup> Total magnesium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全K <sup>+</sup> Total potassium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
玉米秸秆	4.02	3.37	400.93	6.59	0.27	2.67	1.61	14.10
牛粪	7.17	2.75	319.02	19.42	2.56	19.97	15.48	3.47
生物炭	9.37	2.12	251.84	32.29	0.62	10.47	4.36	20.58

1900, 普析通用, 中国)测定。

#### 1.4 数据处理

特定紫外吸光度(SUVA<sub>254</sub>, L·mg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)为254 nm处紫外吸光系数与DOC浓度之比,常用于表征溶解性有机物质(Dissolved organic matter, DOM)的芳香性。SUVA<sub>254</sub>越高,说明有机质的芳香性程度越高,腐殖程度也越高<sup>[20]</sup>。

光谱斜率比值( $S_R$ )与DOM的浓度无关,常用来表征DOM的来源组成及结构变化。 $S_R$ 值与分子量呈反比,即 $S_R$ 值越高,DOM分子量越低<sup>[21]</sup>。 $S_R$ 计算公式如下:

$$S_R = \frac{S_{275-295}}{S_{350-400}}$$

式中: $S_{275-295}$ 与 $S_{350-400}$ 分别为275~295 nm和350~400 nm波段的吸收光谱斜率。

光谱斜率( $S$ )计算公式如下:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \cdot \exp^{S(\lambda_0 - \lambda)}$$

式中: $\lambda$ 为测定波长, nm;  $\lambda_0$ 为参照波长, nm。

本研究中通过如下方式计算田间持水量 $\vartheta$ (%):

$$\vartheta = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m_{p1} - m_{p0}}{m_s} \times 100\%$$

式中: $m_w$ 为土壤田间持水量,即土柱停止渗出水流状态下的土壤含水量, g;  $m_{p1}$ 为土柱停止渗水状态时的土柱质量, g;  $m_{p0}$ 为未加水培养前的土柱质量, g;  $m_s$ 为土柱中填充土壤的干质量, g。

通过Excel 2019进行前期数据整理;采用SPSS 26.0进行单因素方差分析、Duncan显著性差异检验;采用Origin 2021绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机物添加下淋洗液DOC含量及其紫外特性变化

由图1可知,与CK相比,有机物料的添加显著增加了淋出液的DOC含量( $P < 0.05$ ),而且随着淋洗次数的增加,中度和重度盐碱土中淋出的DOC含量均有不同程度的降低。中度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,W1、W2和W3处理中DOC含量的整体趋势为先降低后趋于稳定,各处理大小关系为W1>W2>W3>CK。第2次收集时,CK、W1、W2和W3处理的淋洗液的DOC显著下降,相较第1次淋洗收集时分别降低76.97%、49.52%、34.48%和78.54%。第5次收集时,W1和W2处理间无显著差异,而第1、2、3、4、6次时W1、W2和W3处理间均差异显著( $P < 0.05$ )。重度盐碱土中,W1、W2和W3的DOC含量整体趋势为缓慢

降低,各处理大小关系为W1>W2≈W3>CK。第5次收集时,相较第1次,CK、W1、W2和W3处理的土壤淋洗液,DOC分别降低了74.68%、72.89%、82.73%和89.66%。W2和W3于第1~6次收集中均无显著差异( $P > 0.05$ ),DOC含量变化趋势基本一致。此外,第3~6次收集中,中度和重度盐碱土CK处理淋洗液的DOC含量均无显著差异( $P > 0.05$ ),稳定在87.7~72.9 mg·L<sup>-1</sup>。

溶解性有机物是一类含有丰富的共轭体系的有机化合物,在光谱的紫外区有着较强的信号值。由图2可知,在中度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,各处理的SUVA<sub>254</sub>均呈先增后减的趋势。第1次收集时,CK、W1、W2和W3淋洗液的SUVA<sub>254</sub>差异显著,大小关系为W2>W3>CK>W1,W1、W2和W3的SUVA<sub>254</sub>均于第2次时达到最大值。第5~6次时,W1、W2和W3淋洗液的SUVA<sub>254</sub>均显著低于CK处理( $P < 0.05$ ),但3个处理间无显著差异( $P > 0.05$ )。重度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,CK的SUVA<sub>254</sub>呈下降趋势,W1处理的SUVA<sub>254</sub>呈先增加后下降趋势,且于第3次淋洗时达到最大,整体上小于CK;W2和W3呈先增加后降

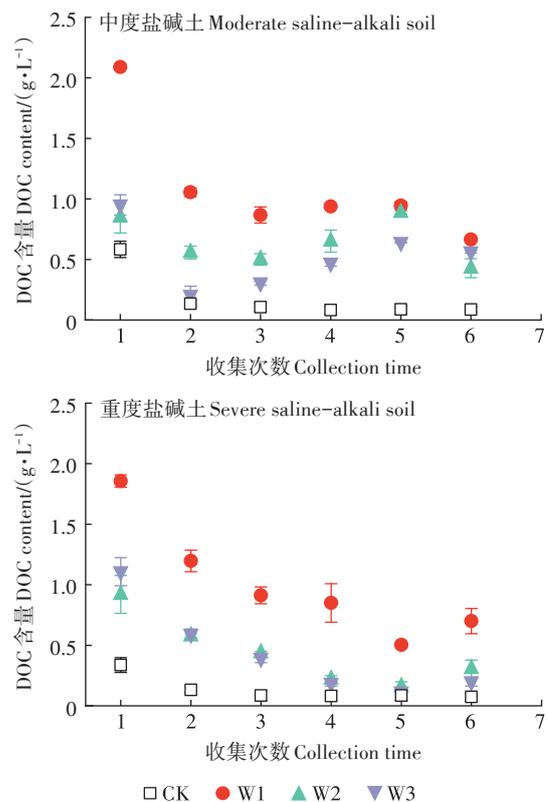


图1 不同处理下两种盐碱土淋洗液DOC含量动态变化  
Figure 1 The dynamic changes of DOC content of two saline-alkali soils eluents under different treatments

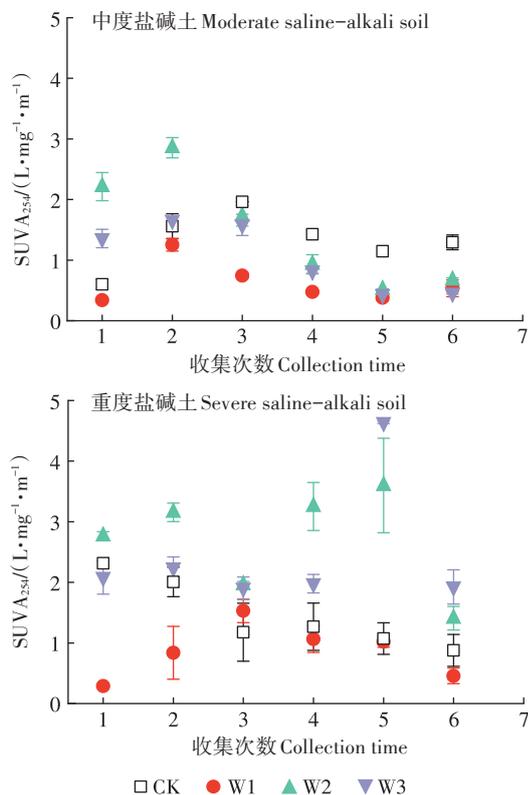
图2 不同处理下两种盐碱土壤淋洗液SUVA<sub>254</sub>变化

Figure 2 Changes of two saline-alkali soils eluents SUVA<sub>254</sub> under different treatments

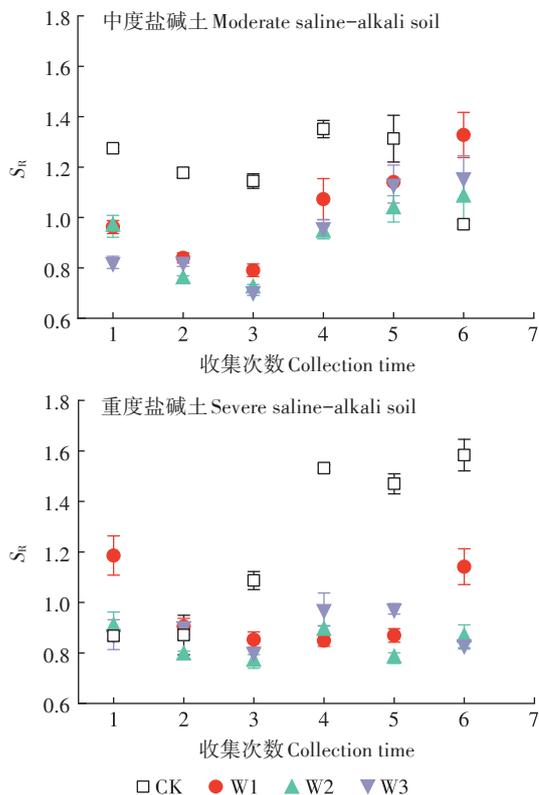
图3 不同处理下两种盐碱土壤淋洗液S<sub>R</sub>变化

Figure 3 S<sub>R</sub> variation of two saline-alkali soils eluents under different treatments

低趋势,均于第5次淋洗时达到最大。至第6次时,W1、W2和W3处理间无显著差异( $P>0.05$ )

由图3可知,中度盐碱土中,CK的 $S_R$ 值于第1~5次淋洗收集时无显著差异( $P>0.05$ ),至第6次时显著降低( $P<0.05$ )。第1~6次时,W1、W2和W3处理间淋洗液的 $S_R$ 值均无显著差异( $P>0.05$ ),随着淋洗次数的增加, $S_R$ 逐渐增加,并于第6次收集时超过CK。在重度盐碱土中,CK的 $S_R$ 值呈递增趋势,至第2次收集后均显著高于W1、W2和W3( $P<0.05$ )。W2、W3的 $S_R$ 值大小趋于稳定,第1~6次淋洗中不同淋洗次数以及处理间均无显著差异( $P>0.05$ )。W1的 $S_R$ 值在第1次淋洗收集时显著高于W2、W3,而在第2~5次淋洗收集中与W2、W3均无显著差异,至第6次时显著增加( $P<0.05$ )。

## 2.2 不同有机物添加下淋洗液盐分的动态变化

淋洗液的含盐量可以反映土壤盐分的渗出状况。由图4可知,两种盐碱土中,不同淋洗次数间淋洗液的含盐量差异显著( $P<0.05$ )。中度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,淋出的盐分含量大小依次为W1>W2>W3>CK,同一处理下各次数间含盐量差异显著( $P<$

0.05)。第1次时,不同处理下淋出盐分含量大小差异显著( $P<0.05$ ),W1、W2和W3相较CK分别增加93.17%、22.12%和12.50%,W1显著高于其他处理。至第4次时,W1、W2和W3已无显著差异( $P>0.05$ ),淋洗液盐分含量均低于 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。重度盐碱土中,各收集次数间含盐量差异显著( $P<0.05$ )。第1次时,不同处理下淋出盐分含量大小差异显著( $P<0.05$ ),大小顺序为W1>W3>W2>CK,相较于CK,W1、W2和W3处理淋出的盐分含量增幅分别为41.46%、1.36%和23.99%。第2次时,W1、W2和W3淋出盐分含量显著增加,分别达到 $26.23$ 、 $23.41\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $28.32\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,此后淋出盐分含量逐渐降低。至第5~6次时,W1、W2和W3间均无显著差异( $P>0.05$ )。

## 2.3 不同有机物添加下土壤盐分和离子含量变化

由图5可知,中度盐碱土中,淋洗前W1、W2和W3处理(T1)的EC相较于CK均不同程度增加,其中W1增幅最大(15.30%)。加入有机物料后无淋洗状态下静置培养相同时间(T2)后测定土壤EC值发现,相较T1状态,CK的EC显著下降( $P<0.05$ ),降幅为7.03%;W1和W2土壤的EC略有增加,增幅分别为

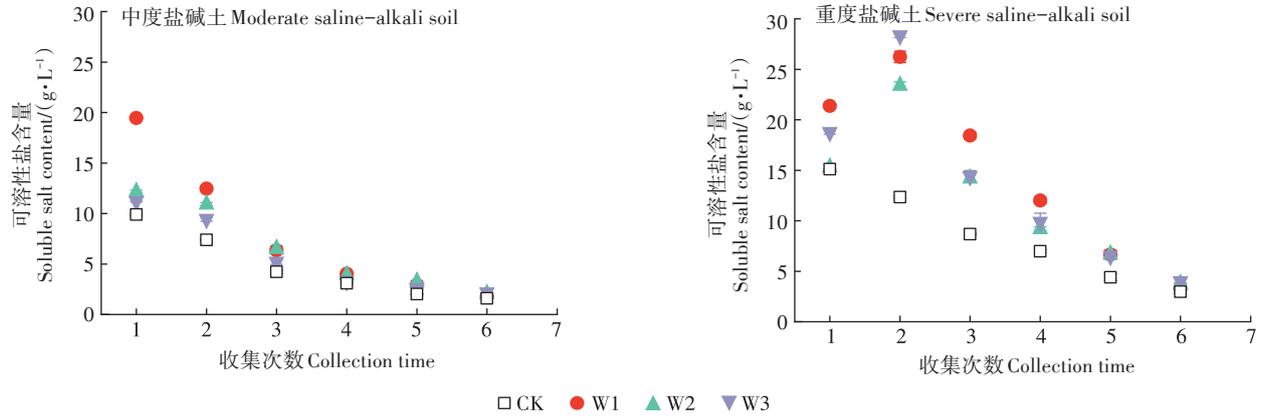
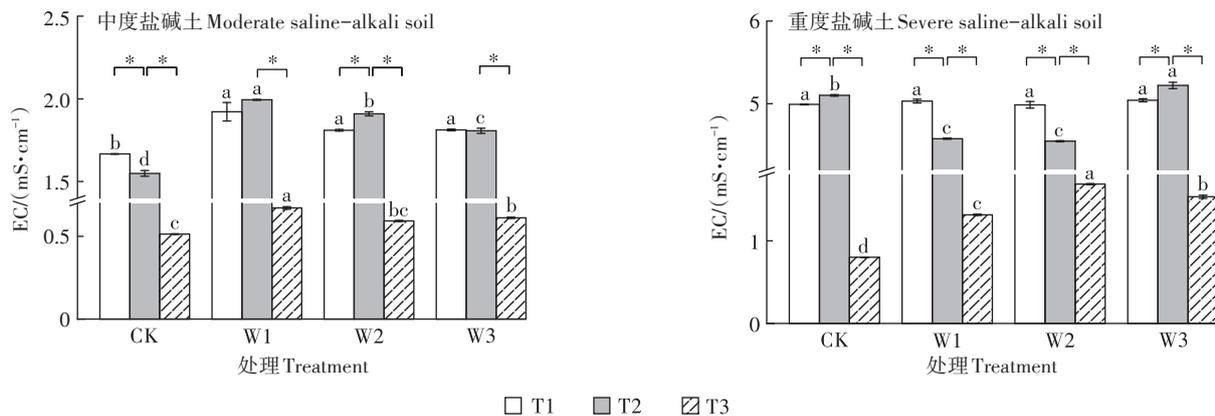


图4 不同处理下两种盐碱土壤淋洗液含盐量变化

Figure 4 Changes in salt content of two saline-alkali soils eluents under different treatments



T1为加入有机物料后立即测定的土壤EC值,T2为加入物料后无淋洗条件下静置培养30 d后测定的土壤EC值,T3为淋洗结束后测定的土壤EC值。不同小写字母表示同一状态下不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。\*表示同一处理下不同状态间的差异性在0.05水平上显著。

T1 is the time of just added organic materials, T2 is the time after 30 days of standing and incubation without leaching after adding materials, and T3 is the time after leaching. The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same time ( $P<0.05$ ). The asterisks indicate significant differences among times in the same treatment ( $P<0.05$ ).

图5 3种状态下不同处理盐碱土壤EC值

Figure 5 Soil EC value of different treatments at three times

3.79%和5.49%,而W3两个状态的EC无显著差异( $P>0.05$ )。经过淋洗后(T3),不同有机物料处理下土壤EC值均显著下降( $P<0.05$ ),CK、W1、W2和W3的EC值范围为0.51~0.67  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,大小关系依次为W1>W3>W2>CK。淋洗条件下,CK、W1、W2和W3相较T1状态的土壤脱盐率分别为69.15%、65.02%、67.22%和66.21%,相较T2状态下的土壤脱盐率分别为66.81%、66.30%、68.92%和66.11%。

重度盐碱土中,T1状态下W1、W2和W3的EC与CK无显著差异( $P>0.05$ )。测定T2状态下土壤EC值发现,相较T1状态,CK的EC有所增加,增幅为2.20%;W1和W2土壤EC显著降低( $P<0.05$ ),降幅分别为9.05%和8.83%;W3的EC值增加了3.57%。T3

状态下,不同有机物料处理的土壤EC值均显著下降( $P<0.05$ ),CK、W1、W2和W3的EC值范围为0.80~1.69  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,大小关系依次为W2>W3>W1>CK。T3状态下,CK、W1、W2和W3相较T1状态的土壤脱盐率分别为83.91%、73.85%、66.14%和69.55%,相较T2状态的土壤脱盐率分别为84.26%、71.25%、62.86%和70.60%。

由表3可知,淋洗结束后不同处理土壤所含可溶性离子含量不同。中度盐碱土淋洗后,W1、W2和W3的可溶性 $\text{K}^+$ 相较CK分别增加39.07%、33.63%和121.04%;各处理土壤中可溶性 $\text{Na}^+$ 大小关系为W1>W2>CK>W3;W1、W2和W3中的可溶性 $\text{Ca}^{2+}$ 和可溶性 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量均与CK无显著差异( $P>0.05$ )。相较处理

前的土壤离子含量,W1、W2和W3处理土壤中可溶性 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量显著降低,降幅范围分别为48.38%~69.32%、70.89%~75.86%和73.00%~74.45%;CK、W1和W2中可溶性 $\text{K}^+$ 含量降低,其中CK降低最多(30.34%),而W3处理土壤可溶性 $\text{K}^+$ 含量不减反增,是淋洗处理前土壤可溶性 $\text{K}^+$ 含量的1.54倍。

重度盐碱土中,W1、W2和W3中可溶性 $\text{K}^+$ 含量无显著差异( $P>0.05$ ),且均显著高于CK;W2和W3中

可溶性 $\text{Na}^+$ 的含量无显著差异,且均显著高于W1和CK;W3中的可溶性 $\text{Ca}^{2+}$ 含量与CK无显著差异,但均显著高于W1和W2;W1、W2和W3中的可溶性 $\text{Mg}^{2+}$ 含量均与CK无显著差异( $P>0.05$ ),经过淋洗后,添加有机物处理下土壤中可溶性 $\text{Mg}^{2+}$ 含量与CK无显著差异,CK中可溶性 $\text{K}^+$ 含量显著降低( $P<0.05$ )。相较处理前土壤可溶性离子含量,添加有机物处理下土壤中可溶性 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量降幅范围分别为

表3 淋洗前后两种盐碱土壤的可溶性阳离子变化

Table 3 Changes of soluble cations in two saline-alkali soils before and after leaching

土壤类型 Soil type	离子种类 Ionic type	淋洗前离子含量 Ion content before elution/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	处理 Treatment	淋洗后离子含量 Ion content after elution/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	变化率 Rate of change/%
中度盐碱土	$\text{K}^+$	448.78±67.85	CK	312.62±28.08c	-30.34
			W1	434.75±22.17b	-3.13
			W2	417.77±0.80b	-6.91
			W3	691.01±16.09a	53.97
	$\text{Na}^+$	2 249.82±235.40	CK	846.89±60.38bc	-62.36
			W1	1 161.44±97.18a	-48.38
			W2	870.33±121.72b	-61.32
			W3	690.13±0.80c	-69.32
	$\text{Ca}^{2+}$	652.18±92.58	CK	152.76±12.72a	-76.58
			W1	189.87±15.91a	-70.89
			W2	158.78±31.38a	-75.65
			W3	157.46±16.03a	-75.86
$\text{Mg}^{2+}$	469.47±61.81	CK	96.97±19.32a	-79.34	
		W1	126.75±16.18a	-73.00	
		W2	120.63±8.23a	-74.30	
		W3	119.94±43.11a	-74.45	
重度盐碱土	$\text{K}^+$	885.37± 87.70	CK	333.71±60.69b	-62.31
			W1	753.79±148.23a	-14.86
			W2	678.27±9.95a	-23.39
			W3	701.24±24.11a	-20.80
	$\text{Na}^+$	9 624.66±451.03	CK	569.47±48.69c	-94.08
			W1	1 363.27±173.22b	-85.84
			W2	2 511.99±178.43a	-73.90
			W3	2 793.2±331.36a	-70.98
	$\text{Ca}^{2+}$	1 202.29±31.35	CK	158.18±2.94a	-86.84
			W1	132.12±8.54b	-89.01
			W2	91.48±21.13c	-92.39
			W3	160.75±2.00a	-86.63
$\text{Mg}^{2+}$	1 746.93±27.71	CK	91.93±20.52a	-94.74	
		W1	79.97±24.17a	-95.42	
		W2	91.23±23.42a	-94.78	
		W3	109.71±10.34a	-93.72	

注:淋洗前后土壤可溶性离子含量均为平均值±标准差;不同字母表示同一土壤不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Ion content is expressed as mean±standard deviation. The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same time( $P<0.05$ ).

14.86%~23.39%、70.98%~85.84%、86.63%~92.39% 和 93.72%~95.42%。

#### 2.4 不同有机物料添加下的土壤持水状况

由图6可知,不同有机物料处理下盐碱土壤的持水量差异较大,添加有机物料显著提高了土壤田间持水量( $P<0.05$ )。中度盐碱土中,田间持水量大小依次为  $W1>W2>W3>CK$ ,  $W1$ 、 $W2$  和  $W3$  的持水量均值相较  $CK$  分别增加了 31.00%、25.65% 和 15.24%。重度盐碱土中,  $W1$  与  $W2$  处理间的持水量无显著差异( $P>0.05$ ),  $W1$ 、 $W2$  和  $W3$  相较  $CK$  分别增加了 76.46%、74.33% 和 34.69%。

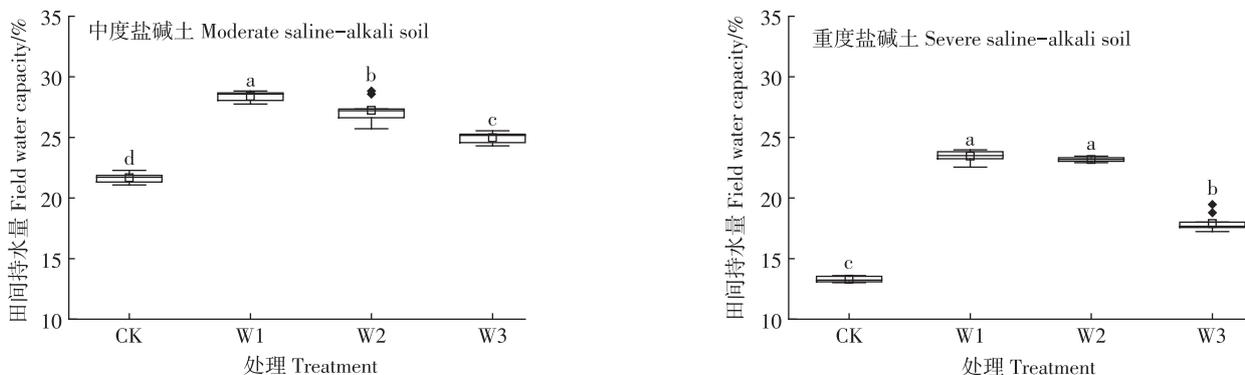
### 3 讨论

#### 3.1 秸秆及其配施对不同盐碱土淋洗液 DOC 及其紫外光谱特性的影响

中度和重度盐碱土中,  $CK$  淋洗液的 DOC 含量均于第3次淋洗后无显著差异(图1),这表明对于无物料添加下的盐碱土壤,淋洗会降低土壤自身的有机物质含量,当土壤环境稳定后,土壤 DOC 的损失率并不随淋洗次数的增加而变化,呈稳定损失状态,这可能是因为原生盐碱土壤在首次淋洗时将土壤中易溶解有机碳释放出来,此后土壤中主要为难分解及难解吸的有机碳,在首次淋洗后土壤逐渐“适应”淋洗水分的过程(如孔隙通道、微生物状态等),使得有机碳分解及解吸速率稳定<sup>[22-23]</sup>。两种盐碱土淋洗液的 DOC 含量对添加有机物料的反应不同。中度盐碱土中,添加有机物料处理( $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ )的 DOC 于第2~5次淋洗液中逐渐增加,说明在淋洗过程中添加的有机物料腐殖化加快,土壤中溶解性有机物质增加,这可能是由于有

机物料的添加刺激了土壤脱氢酶、磷酸酶等酶活性<sup>[24]</sup>,促进了土壤中原有机物的分解,此外,物料本身含有丰富的有机物质,在水分充足、盐胁迫较小环境下有机物分解较快,从而增加了土壤可溶性有机物质含量。重度盐碱土中,添加有机物料处理的 DOC 于第1~4次中逐渐减少,这可能是由于盐分的抑制作用仍然占据主导位置,而土壤盐度的增加能够抑制分解酶的活性。李玲等<sup>[25]</sup>的矿化培养试验也表明在外源碳输入条件下适当的盐分会促进土壤有机质分解,而高盐分会抑制土壤微生物活性以及对外源碳的利用率。淋洗过程中,在  $W2$  持水性显著高于  $W3$  的情况下,中度盐碱土  $W2$  的 DOC 含量高于  $W3$ 、重度盐碱土  $W2$  和  $W3$  淋出的 DOC 含量无显著性差异,表明配施生物炭处理降低了 DOC 的淋洗含量,这一方面归因于生物炭性质稳定,而牛粪在土壤中会逐渐释放出溶解性有机物质;另一方面,生物炭表面丰富的孔隙和官能团能够聚集有机物质,从而降低了土壤 DOC 的损失。

中度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,有机物料处理及  $CK$  的  $SUVA_{254}$  均呈现先增加后降低的趋势(图2),即淋洗出的溶解性有机物质的芳香性随着淋洗次数的增加先增后降。第1、2次淋洗收集时,  $W2$  的  $SUVA_{254}$  显著高于  $CK$ ,表明配施牛粪分解产生的溶解性有机物质的芳香化程度较高,这可能是由于牛粪质地细腻,且自身含有的化学成分易转化,使得其淋洗出的溶解性物质含有更多的芳香性物质,如芳香族和不饱和共轭双键等结构<sup>[26]</sup>;而秸秆中纤维素、木质素等难分解的成分相对较多,使得  $W1$  淋洗出的溶解性物质芳香性低于  $CK$ 。随着淋洗的进行,添加有机物料处理的  $SUVA_{254}$  于第5次和第6次间无显著差异,且均低于  $CK$ ,



不同小写字母表示同一土壤不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same time ( $P<0.05$ ).

图6 不同有机物料处理下两种土壤田间持水量差异

Figure 6 Differences in water holding capacity between the two soils under different organic material treatments

意味着随着牛粪和生物炭中易分解的溶解性物质被淋出,土壤淋洗出的溶解性有机物开始以秸秆分解释放的低芳香性、分子量较小的可溶性物质为主。这归因于第1~5次淋洗收集中,同一土壤添加有机物料处理淋洗间的SUVA<sub>254</sub>差异性变化主要来源于1%复配比例的不同。

重度盐碱土中,随着淋洗次数的增加,CK淋洗出的溶解性有机物芳香化程度以及分子量逐渐降低,说明在淋洗作用下,原生盐碱土中自身有机物质分解或团聚体表面释放的可溶性有机物质减少,大部分以腐殖化程度较高的有机物质形式存留。Dong等<sup>[27]</sup>指出相较肥沃土壤,受盐影响土壤的溶解性有机物质腐殖化程度更深、更古老、更稳定,因为在盐胁迫下土壤有机质更难降解。不同于中度盐碱土,重度盐碱土中W2的SUVA<sub>254</sub>在淋洗过程中均高于CK,这可能是由于相较中度盐碱土,重度盐碱土中W2的持水性较低,淋洗过程中有机物质与水充分接触程度相对较低,使得牛粪的芳香化过程能在土壤中持续发生,导致淋出的有机质的SUVA<sub>254</sub>值较高、分子量较大。相较中度盐碱土,重度盐碱土中W1、W2和W3中SUVA<sub>254</sub>的峰值由第2次分别变为第3次、第5次和第5次,这也表明淋洗出的大分子物质芳香化过程的延长,更多的有机物质固存在土壤中得以不断芳香化。

S<sub>R</sub>常用来反映水体有机质的来源与类型,包括分子量大小、自生源与外源特征、光漂白活性等<sup>[28-29]</sup>。中度盐碱土中,添加有机物料处理淋洗出的可溶性有机物的分子量显著高于CK(图3),而可溶性有机物分子量越低,意味着可溶性有机物多为新近产生<sup>[30]</sup>。随着淋洗过程的进行,土体中盐分降低,中度盐碱土添加有机物料处理的S<sub>R</sub>逐渐增大并于第6次超过CK,表明添加的有机物料分解程度加深,释放出小分子量的溶解性物质,这与张艳艳<sup>[31]</sup>的研究结果不同,这可能是由于外源添加的新鲜有机物料在水分适宜条件下分解转化程度不断加深,而产生的小分子量物质更容易被淋洗出来。李小刚等<sup>[32]</sup>的研究表明玉米秸秆中的木质素分解时趋向于形成芳香族化合物,而纤维素在分解过程中按照纤维素碳→水解碳→热水提取碳→单糖碳逐渐分解转变。重度盐碱土中有机物料处理的S<sub>R</sub>无显著差异,这可能是由于此时盐分胁迫作用依然占据主要地位,因为重度盐碱土第3次淋洗收集时淋洗液的盐分量与中度盐碱土第1次淋洗收集的盐分量差异不显著( $P>0.05$ ),即重度盐碱土第3次淋洗收集后的盐分含量与中度盐碱土第1次淋洗收集后土

壤盐分含量相近。

### 3.2 秸秆及其配施对不同盐碱土盐分、离子含量和持水特性的影响

随着淋洗次数的增加,土壤中淋出的可溶性盐分逐渐减少,这是由于土壤中的可溶性盐分在机械弥散作用下会从土壤表层向深层迁移并进入到淋洗液中,随着淋洗过程的进行土壤中可迁移的盐分含量下降,淋洗液的可溶性盐含量降低并趋于稳定(图4)。Wang等<sup>[33]</sup>的研究也表明灌溉会降低不同深度土层中的盐分,盐分随着灌溉次数的增加而降低。添加有机物料会显著增加土壤淋出盐分,这与Chaganti等<sup>[34]</sup>的研究相似。中度和重度盐碱土中,W1处理均显著增加淋洗液盐分含量,这一方面归因于秸秆吸水膨胀使得土壤形成疏松多孔的结构,增大了水分下移孔隙通道,促进了盐分的下移,另一方面秸秆矿化释放出自身的盐基离子,从而增加了淋洗液盐含量。但无论是CK还是有机物料添加处理,中度盐碱土至第4次收集(12次淋洗),淋洗液盐分可降低至 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,重度盐碱土至第5次收集(15次淋洗)降低至 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

对于有机物料加入下盐碱土淋洗过程,前人的研究大多关注淋洗后土壤EC值的变化,而较少关注添加物料后不同状态的土壤EC值<sup>[19,35-36]</sup>。通过测定添加有机物料充分混匀后的土壤EC值和加入物料后无淋洗条件下静置培养30 d的土壤EC值,发现中度盐碱土静置30 d培养后CK土壤的EC值降低,而重度盐碱土增加(图5),这可能是由于有机物质分解、微生物活动等调节作用引起盐碱化程度相对较轻土壤的盐分下降,而盐碱化程度较重的土壤,由于土粒分散引起的盐分释放以及土壤颗粒内部盐分外渗等导致土壤可溶性盐分增加<sup>[37]</sup>。这意味着盐碱土的EC值会因为测定的时间段不同而存在差异。W1和W2在两种土壤的EC值表现并不一致。静置过程中,中度盐碱土的EC值有所上升,这可能是由于秸秆、牛粪等外源有机物质的盐分引入导致;而重度盐碱土中,静置后土壤EC值显著降低,降盐效果明显,可能是物料自身盐分小于土壤中的盐分,对土壤盐分进行了充分的物理性稀释。经过淋洗后,添加有机物料处理在中度和重度盐碱土中的脱盐率表现不同。相同淋洗条件下,重度盐碱土的CK脱盐率(83.91%)显著高于中度盐碱土(69.15%),这是由于重度盐碱土的砂粒含量大于中度盐碱土,使得土壤孔隙更多,水流通道更大,在彻底淋透的情况下,更容易造成水分流失;同时,重度盐碱土的持水能力显著低于中度盐碱土,这使得盐

分和 $\text{Na}^+$ 能够快速随水下渗,但也导致土壤DOC的快速流失,加剧了盐碱土壤贫瘠化。中度和重度盐碱土中CK的EC值低于添加有机物料处理,这是因为有机物料的加入在增大土壤孔隙的同时,也显著提高了土壤的持水能力(图6)，“盐随水动”，使得部分盐分随水保持在土体中,同时,有机物料矿化释放出的盐分离子(表2、表3)进一步增加了土壤中的盐分含量。此外,有机物料腐殖化形成的有机酸也会吸附土壤中的盐基离子,从而导致添加有机物处理淋出的盐分含量显著高于CK。添加有机物料处理下淋洗液的含盐量相较CK增大,而淋洗后土壤盐分高于CK,说明不同有机物料自身含盐量是否会增大土壤盐分需要考虑土壤盐碱程度和物料对土壤持水能力的增强效果。

中度盐碱土中添加秸秆对土壤持水能力增强显著(图6),一方面是由于玉米秸秆吸水性强,能吸附大量水分子,另一方面玉米秸秆主要由粗纤维、木质素等构成,填充土壤后使得土壤孔隙形状变得更复杂、不规则,而孔隙形状越复杂、越不规则,越不利于水分向下层土壤运移<sup>[38]</sup>,从而提高土壤持水性。相较易分解有机物料(秸秆配施牛粪),难分解的生物炭对土壤持水能力增加不显著。Razzaghi等<sup>[39]</sup>指出生物炭能提高粗质地土壤中的有效含水量,但向黏土中添加过量的生物炭可能会导致土壤水分有效性降低,这归因于生物炭烧焦材料的疏水性质及其粒径分布的影响。

有机物的添加补充了土壤 $\text{K}^+$ 含量,经过淋洗后,中度盐碱土中W3处理 $\text{K}^+$ 含量不降反增,这是因为秸秆和生物炭含有相对丰富的钾(表2),此外生物炭表面的羧基等官能团提供的大量阳离子结合位点,能吸附大量的 $\text{K}^+$ ,减少其淋洗损失,从而使土壤 $\text{K}^+$ 含量增加。尽管秸秆、牛粪和生物炭均含有较高的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ ,其中牛粪 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量分别为19.97、15.48  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,但经过淋洗后,中度盐碱土壤中添加有机物处理的可溶性 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量与CK无显著差异,重度盐碱土中 $\text{Mg}^{2+}$ 含量与CK无显著差异,而王舒华等<sup>[19]</sup>的淋洗试验表明随着淋洗次数增加淋滤液中可溶性 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量会不断减少。假定有机物矿化过程中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的稳定性和矿化程度相同,那么 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量与CK无显著差异归结于外源有机物提高了两种盐碱土壤离子的淋洗速率,则外源有机物自身含量不多的 $\text{Na}^+$ 会显著低于CK,因为可溶性 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 在土壤剖面中的迁移率高于 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ <sup>[40]</sup>,而结果相反意味着外源有机物处理中的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 可能存在

不稳定,而二价阳离子,尤其是 $\text{Mg}^{2+}$ 存在相对稳定,如置换出胶体表面的一价离子后以交换态形式存在等。重度盐碱土中W2、W3处理的 $\text{Na}^+$ 含量显著高于W1,这与高惠敏等<sup>[41]</sup>的研究结果一致。这一方面是由于牛粪含有的 $\text{Na}^+$ 远高于秸秆和生物炭(表2),另一方面生物炭巨大的比表面积和较高的表面电荷密度吸附了土壤中 $\text{Na}^+$ ,使得 $\text{Na}^+$ 抵抗水分运动作用增强。

## 4 结论

(1)淋洗会降低原生盐碱土壤溶解性有机质含量,当土壤环境稳定后中、重度盐碱土壤中溶解性有机碳含量均不随淋洗次数的增加而变化,但有机物质的腐殖化程度不同。中度盐碱土中溶解性有机物芳香性和分子量不变,重度盐碱土中溶解性有机物芳香性降低、分子量减小。

(2)有机物料的输入会增加两种盐碱土溶解性有机碳含量,但不同处理在两种盐碱土壤中腐殖化程度表现不同。中度盐碱土中,添加物料处理均表现为芳香性降低,其物料组成对溶解性有机物的分子量无显著影响,且分子量均逐渐减小;重度盐碱土中,添加物料处理下的溶解性有机物分子量均较大,其中添加3%秸秆处理的芳香性低于配施牛粪或生物炭处理。

(3)有机物料的输入提高了淋洗液盐分含量,随着淋洗次数的增加,添加有机物料土壤中淋出的可溶性盐分逐渐减少并趋于稳定。外源添加有机物料是否会增大土壤盐分需要考虑土壤盐碱程度和对土壤持水能力的增强效果。尽管物料显著增强土壤持水能力,增大了中度盐碱土电导率,但给定淋洗条件能够有效抵消有机物料对中度盐碱土电导率带来的负面影响。而对于重度盐碱土,3%秸秆和配施1%牛粪能够通过物理性稀释有效降低土壤盐分。

(4)给定淋洗条件下,中度盐碱土中3%秸秆引入的盐分最高,持水能力最强,分解产生的溶解性有机碳最多,溶解性有机物腐殖化程度最深,而脱盐、降 $\text{Na}^+$ 效果最好的为2%秸秆配施1%牛粪处理。重度盐碱土中各处理盐分引入处理间无显著差异,3%秸秆和2%玉米秸秆配施牛粪处理持水量最大,3%秸秆处理分解产生的溶解性有机碳含量最高,2%玉米秸秆配施牛粪处理腐殖化程度最深,脱盐效果最好的为3%玉米秸秆处理。

### 参考文献:

[1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望

- [J]. 土壤学报, 2022, 59(1):10-27. YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1):10-27.
- [2] 付同刚, 蒋莞艳, 刘鹏, 等. 内蒙古河套灌区盐碱地治理中农户参与意识及其影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(4):625-632. FU T G, JIANG G Y, LIU P, et al. Farmer's participation consciousness and the influencing factors in the reclamation of saline-alkali land in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(4):625-632.
- [3] 郭姝姝, 阮本清, 管孝艳, 等. 内蒙古河套灌区近30年盐碱化时空演变及驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):159-162. GUO S S, RUAN B Q, GUAN X Y, et al. Analysis on spatial-temporal evolution of soil salinity and its driving factors in Hetao Irrigation District during recent 30 years[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(9):159-162.
- [4] SAHAB S, SUHANI I, SRIVASTAVA V, et al. Potential risk assessment of soil salinity to agroecosystem sustainability: current status and management strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 764:144164.
- [5] YING Z, CUI Y J, BENAHMED N, et al. Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(4):855-863.
- [6] XIE W, WU L, ZHANG Y, et al. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 169:1-6.
- [7] XUAN K, LI X, YU X, et al. Effects of different organic amendments on soil pore structure acquired by three-dimensional investigation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(4).
- [8] AL-BUSAIDI K T S, BUERKERT A, JOERGENSEN R G. Carbon and nitrogen mineralization at different salinity levels in Omani low organic matter soils[J]. *Journal of Arid Environments*, 2014, 100/101:106-110.
- [9] ZHANG Y, WANG W, YUAN W, et al. Cattle manure application and combined straw mulching enhance maize (*Zea mays* L.) growth and water use for Rain-Fed cropping system of coastal saline soils[J]. *Agriculture*, 2021, 11(8):745.
- [10] 王庆蒙. 不同培肥措施对河套灌区盐渍化农田改良效果研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020. WANG Q M. Study on the effect of different fertilization measures on salinized farmland improvement in Hetao Irrigation Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [11] 王丽娜, 杨瑛, 杜苏. 生物炭施入对盐碱土壤影响的研究现状[J]. 中国农学通报, 2022, 38(8):81-87. WANG L N, YANG Y, DU S. Effects of biochar application on saline-alkali soil: research status[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(8):81-87.
- [12] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722:137428.
- [13] 杨放, 李心清, 荆英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):972-977. YANG F, LI X Q, XING Y, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):972-977.
- [14] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6):2298-2303. ZHANG T, WANG X D, PANG M W, et al. Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6):2298-2303.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:178-188. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:178-188.
- [16] CUI Q, XIA J, YANG H, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756:143801.
- [17] 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质[J]. 环境科学, 2023, 44(7):4119-4129. ZHAO H L, YU J Y, LIU T, et al. Application of desulphurized gypsum with straw to improve physicochemical properties of saline-alkali land in Yellow River Delta[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(7):4119-4129.
- [18] XIE W J, CHEGN Q F, WU L F, et al. Coastal saline soil aggregate formation and salt distribution are affected by straw and nitrogen application: a 4-year field study[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198:104535.
- [19] 王舒华, 陈爽, 王悦, 等. 不同有机物料对盐碱土的淋洗效果研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6):376-383. WANG S H, CHEN S, WANG Y, et al. Study on leaching effect of different organic materials on saline-alkali soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6):376-383.
- [20] JAFFRAIN J, GERARD F, MEYER M, et al. Assessing the quality of dissolved organic matter in forest soils using ultraviolet absorption spectrophotometry[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(6):1851-1858.
- [21] LI Y, ZHANG L, WANG S, et al. Composition, structural characteristics and indication of water quality of dissolved organic matter in Dongting Lake sediments[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97:370-380.
- [22] 梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 不同施肥处理下我国典型农田土壤对溶解性有机碳的吸附特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1):72-79. LIANG Y Y, WANG X L, XU M G, et al. Adsorption characteristics of dissolved organic carbon under different fertilization treatments in typical farmland soils in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1):72-79.
- [23] WONG V N L, GREENE R S B, DALAL R C, et al. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(1):2-11.
- [24] TEJADA M, GARCIA C, GONZALEZ J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6):1413-1421.
- [25] 李玲, 仇少君, 檀菲菲, 等. 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机

- 碳分解与转化的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6844-6852. LI L, QIU S J, TAN F F, et al. Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6844-6852.
- [26] 田翔, 何天容, 尹德良, 等. 土壤溶解性有机质结构和组成对秸秆、牛粪及其堆肥产品输入的响应特征[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 556-566. TIAN X, HE T R, YIN D L, et al. Responses of soil dissolved organic matter properties to the amendment of straw, cow manure, or their composting products[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(3): 556-566.
- [27] DONG X L, LI M Z, LI Q M, et al. Soil  $\text{Na}^+$  concentration controls salt-affected soil organic matter components in Hetao Region China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1120-1129.
- [28] 黎烨, 周聪聪, 戴零星, 等. 滇池流域土壤活性腐殖质及其主要组分的紫外-可见与三维荧光光学特性[J]. 环境科学学报, 2017, 37(3): 1098-1106. LI Y, ZHOU C C, DAI L X, et al. Ultraviolet-visible and three-dimensional fluorescence spectroscopy characteristics of soil active humus and its main compositions at Dianchi Lake basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(3): 1098-1106.
- [29] HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 955-969.
- [30] 刘堰杨, 秦纪洪, 孙辉. 川西高海拔河流中溶解性有机质(DOM)紫外-可见光吸收光谱特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3662-3671. LIU Y Y, QIN J H, SUN H. UV-VIS spectral characteristics of dissolved organic matter(DOM) of the natural alpine rivers in the western Sichuan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9): 3662-3671.
- [31] 张艳艳. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机碳淋溶特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016: 38-39. ZHANG Y Y. Study on soil dissolved organic carbon leaching characteristics in coastal wetland of Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016: 38-39.
- [32] 李小刚, 崔志军, 王玲英. 施用秸秆对土壤有机碳组成和结构稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 421-428. LI X G, CUI Z J, WANG L Y. Effect of straw on soil organic carbon constitution and structural stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 421-428.
- [33] WANG Y, DOU S, WANG L, et al. Salinity variability of soda meadow alkaline soil in different depths of subsurface pipe[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(6): 2801-2809.
- [34] CHAGANTI V N, CROHN D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260: 45-55.
- [35] 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.
- [36] 项子宸, 马琨, 杨梢娜, 等. 淋洗条件下不同改良剂对浙江东部滨海盐碱土的改良效果[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(3): 344-359. XIANG Z C, MA K, YANG S N, et al. Effect of different ameliorants on coastal saline-alkali soil in eastern Zhejiang under elution conditions[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2020, 46(3): 344-359.
- [37] LI D D, YANG B B, YANG C D, et al. Effects of salt content on desiccation cracks in the clay[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(19): 671.
- [38] 张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1-9. ZHANG W J, LI S Y, XU Y D, et al. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9.
- [39] RAZZAGHI F, OBOUR P B, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114055.
- [40] MAHMOODABADI M, NAJME Y, LEONOR R S, et al. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): redistribution of soluble cations within the soil profile[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 30-38.
- [41] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1172-1179. GAO H M, WANG X P, QU Z Y, et al. Effects of different soil amendments on salinity index and crop yield in the Irrigation Area of Hetao [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(5): 1172-1179.