

施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响

王著峰^{1,2,3}, 王玉刚^{1,2,3}, 陈园园^{1,2,3}, 冯文婷^{1,2}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐 830011;

2.中国科学院阜康荒漠生态系统国家野外科学观测站,新疆 阜康 831505;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 增加陆地生态系统碳固定能力能有效缓解大气 CO₂ 升高引起的温室效应。以干旱区典型盐土和碱土为研究对象,通过室内土柱模拟试验,研究不同施用量脱硫石膏(0,10,20,21.78,30,40 t/hm²)对盐土和碱土生态系统碳储量(包括土壤碳储量和生物量碳储量)的影响。结果表明:与对照相比,施加脱硫石膏盐土总碳储量(C)降低 8.78%~15.72%,其中以土壤有机碳储量降低为主;碱土总碳储量(C)增加 5.00%~23.94%,其中以土壤无机碳增加为主。脱硫石膏施加后盐土总生物量碳储量(C)较对照平均降低23.14%,碱土总生物量碳储量(C)较对照平均增加 30.44%。施用脱硫石膏碱土生态系统碳储量(C)较对照增加 0.09~0.42 kg/m²,而盐土生态系统碳储量(C)较对照降低 0.33~0.56 kg/m²。相关分析结果表明,脱硫石膏施放量、土壤电导率以及由脱硫石膏施加引起的土壤含水量变化是影响盐碱土生态系统固碳的主要因素。总体上,施加脱硫石膏后,盐土生态系统碳储量显著降低,碱土生态系统碳储量显著增加,其中施放量 30,40 t/hm² 处理对盐碱土生态系统碳储量影响效果最大。研究结果可为增加干旱区生态系统碳固定提供科学参考。

关键词: 盐碱土; 生态系统碳储量; 土壤碳; 生物量碳; 脱硫石膏; 土柱模拟

中图分类号: S155.2⁺ 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)02-0353-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.047

Effects of Applying Flue Gas Desulfurization Gypsum (FGDG) on Carbon Sequestration in Saline-sodic Soils

WANG Zhufeng^{1,2,3}, WANG Yugang^{1,2,3}, CHEN Yuanyuan^{1,2,3}, FENG Wenting^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2.National Fukang Desert Ecosystem Field Science Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Fukang, Xinjiang 831505; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The greenhouse effect induced by elevated CO₂ can be alleviated by increasing capacity of carbon (C) sequestration in terrestrial ecosystems. Here, we carried out an indoor column simulation experiment with saline and sodic soils to assess the responses of ecosystem C stocks (including the C stock in soil and plant biomass) under the different amounts of flue gas desulfurization gypsum (FGDG) application (0, 10, 20, 21.78, 30, and 40 t/hm²). The results showed that: Compared with the control treatment, soil C stock decreased by 8.78%~15.72% in the saline soils as a result of the decrease in soil organic C stock. In contrast, soil C stock increased by 5.00%~23.94% in sodic soils with the application of FGDG largely derived from the increase of soil inorganic C stock. The C stock of wheat biomass decreased by 23.14% in saline soils and increased by 30.44% in sodic soils. The C stock of ecosystem increased by 0.09~0.42 kg/m² in sodic soils and decreased by 0.33~0.56 kg/m² in saline soils with the application of FGDG. These changes of C stock in the saline-sodic soils ecosystems were dominantly attributed to the amount of FGDG application, soil electrical conductivity, and the changes of water holding capacity caused by the application of FGDG. In a word, our study indicated that the C stock of ecosystems decreased in saline soils and increased in sodic soils, especially at the amount of 30 and 40 t/hm² FGDG. This study will provide a scientific reference for increasing soil C sequestration in arid areas.

Keywords: saline-sodic soils; ecosystem carbon stock; soil carbon; biomass carbon; flue gas desulphurization gypsum (FGDG); soil column simulation

我国盐碱土地面积为 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占全国可耕地面积的 25%^[1]。由于不合理的耕作和灌溉等措施, 土壤盐碱化已成为制约干旱区农业开发生产的主要障碍因素^[2]。采取合理改良措施以恢复和重建盐碱胁迫地区土地生产力, 是缓解人口数量与可耕地面积间矛盾关系、促进农业可持续发展的战略措施, 也是增强干旱生态系统碳汇和缓解气候变化的有效举措。脱硫石膏作为燃煤脱硫副产物, 是一种高效的盐碱土壤化学改良剂^[3]。目前针对脱硫石膏改良盐碱土的研究主要集中在 Ca—Na 置换的改碱过程及改碱效果^[4-7], 而对改良过程中生态系统固碳潜力的了解十分匮乏^[8]。因此, 研究施用脱硫石膏对盐碱土生态系统碳储量的影响, 有助于认识人为活动干扰下的区域碳循环, 进而为有效管理干旱区生态系统碳收支提供参考。

生态系统碳储量包括土壤碳储量和植被碳储量, 其中土壤碳包括有机碳和无机碳, 植物碳包括地上生物量碳和地下生物量碳^[9]。干旱区土壤有机碳含量较低, 土壤无机碳是土壤碳库的主要贮存形式^[10]。土壤无机碳由土壤溶液中的碱性盐 (CO_3^{2-} 和 HCO_3^-) 和淀积碳酸盐共同组成^[10], 主要受物理化学过程影响, 但受限于 Ca^{2+} 供给, 碳酸盐或钙积层的形成过程十分缓慢^[11]。利用脱硫石膏改良盐碱土过程中, 脱硫石膏溶解释放出的 Ca^{2+} 易与碱性盐结合形成碳酸钙沉淀, 从而促进以难溶性碳酸盐形式主导的土壤无机碳固存过程^[12]。土壤有机碳一般受生物过程影响, 由动植物残体、根系分泌物等共同组成, 与植被生产力存在较强的反馈作用。脱硫石膏改良盐碱土过程能通过不同途径影响土壤有机碳的形成和分解。改良后的土壤有利于植物根系生长, 从而促进凋落物或植物根系向土壤系统的有机质输入过程^[13]。 Ca^{2+} 富积也有利于促进土壤颗粒团聚^[14], 提升对土壤有机碳的物理保护, 降低碳矿化速率^[15]。同时, 交换态 Ca^{2+} 通过离子键桥作用也可以发挥对土壤有机质的化学保护作用^[16]。部分研究^[17]表明, 施用脱硫石膏对盐碱土微生物活性具有短期刺激作用, 从而加速土壤有机碳矿化和分解过程, 减少土壤有机碳贮存量。已有研究^[18]表明, 施加脱硫石膏对盐碱土碳储量的影响还取决于土壤 pH、电导率等环境因子。总体而言, 施用脱硫石膏对干旱区盐碱土生态系统碳储量的影响效果尚不清楚^[8,19]。

因此, 本试验以干旱区盐土和碱土为研究对象, 通过室内土柱模拟, 系统评估以脱硫石膏为钙源物的盐碱土改良过程中生态系统碳固存效益, 量化施加脱硫石膏对盐土、碱土总碳储量和生物量碳储量的影响, 阐明不同施加量脱硫石膏处理下生态系统碳储量

变化特征及其影响因素, 为实现干旱生态系统的可持续发展提供依据。

1 研究区概况

新疆盐碱土地面积为 $2.81 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占全国受盐碱胁迫土地面积的 1/3^[1]。研究区位于新疆天山山脉东部博格达峰北麓, 准噶尔盆地东南缘的绿洲—荒漠交汇带 ($43^\circ 20' - 45^\circ 30' \text{ N}$, $87^\circ 45' - 88^\circ 20' \text{ E}$)。该区域气候属于典型的温带荒漠大陆性气候, 夏季高温少雨, 冬季寒冷干燥。年均气温 6.62° C , 年均降水量 164 mm , 年均潜在蒸发量达 $2\,000 \text{ mm}$ 以上^[20]。原生植被以怪柳科为建群种的耐盐植物群落为主, 群落结构单一, 物种多样性较少。区域内土地利用类型包括耕地、草地、人工林地等。由于邻近古尔班通古特沙漠南缘, 耕地土壤相对贫瘠且受盐碱胁迫程度较大。种植作物以小麦、棉花、葡萄等为主。中国科学院新疆阜康荒漠生态系统观测研究站 ($44^\circ 17' \text{ N}$, $87^\circ 56' \text{ E}$) 坐落于研究区内阜北农场。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验于 2018 年 5—10 月在中国科学院新疆阜康荒漠生态系统观测研究站进行。选用盐土和碱土 2 种土壤类型为研究对象, 盐土取自于阜康荒漠生态系统观测研究站, 碱土取自于古尔班通古特沙漠南缘荒漠。2018 年 5 月 23 日分别采集两区域 0—20 cm 土壤样品, 带回实验室, 去除植物根系、石子等杂物, 置于阴凉处自然风干、磨碎并过 2 mm 筛。经测定土壤 pH 为 8.52, 电导率为 4.87 mS/cm ; 碱土 pH 为 9.73, 电导率为 0.68 mS/cm (表 1)。盐土和碱土符合国际上盐渍化土壤分类标准^[21]。脱硫石膏于 2018 年 4 月取自新疆乌鲁木齐市电厂, 主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (CaSO_4 占含量的 84.04%)。

表 1 供试土壤基础理化特性

土壤类型	pH	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机碳储量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	无机碳储量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
盐土	8.52 ± 0.04	4.87 ± 0.11	1.02 ± 0.02	2.25 ± 0.01
碱土	9.73 ± 0.05	0.68 ± 0.01	0.36 ± 0.09	1.48 ± 0.03

注: 表中数据为平均值士标准误。

2.2 试验装置与方法

试验装置由 PVC 土柱和三脚架组成 (图 1), 管内直径 15 cm, 高度 60 cm。土柱底部均匀放置石英砂和石英石, 装填厚度 10 cm, 用尼龙纱布包裹土柱底部。试验设置 5 个脱硫石膏施加梯度: 10, 20, 21.78, 30, 40 t/hm^2 , 理论施加量 21.78 t/hm^2 根据电荷守恒定律计算而得, 即置换土壤中交换性 Na^+ 和 Mg^{2+} 所需的脱硫石膏交换性 Ca^{2+} 总量^[22]。对照处理不添加脱硫石膏, 每个处理 5 次重复, 共计 60 个土柱。

按土壤容重 1.40 g/cm^3 装填土柱^[23], 填充高度 30 cm。在装填 0—20 cm 土壤剖面前, 将土壤与一定量的脱硫石膏充分混合。为使土柱接近农田真实环境, 施加 3.18 L 井水 (pH 为 8.16, 电导率为 $0.45 \mu\text{S/cm}$) 进行预处理。待土壤自然沉降结束后进行作物种植, 每个处理种植小麦 1 g, 约 24 粒/柱。小麦生长过程中共灌水 3 次, 灌水定额 $750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 在二叶一心时第 1 次浇水, 间隔 10 天进行第 2 次灌溉, 再间隔 15 天进行第 3 次灌溉。

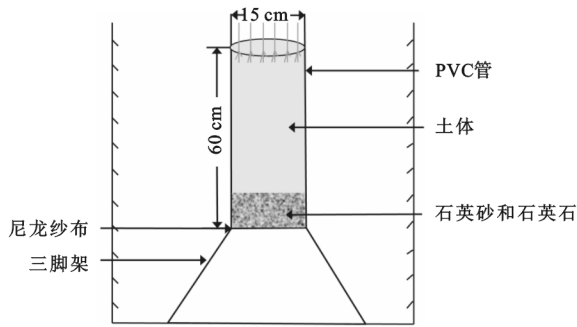


图1 土柱模拟试验装置

2.3 测试指标与方法

2018年9月7日, 采用收割法剪取植物地上部分(包括植物的茎、麦粒和枯枝落叶), 采用挖掘法收集植被地下部分(以植被根系为主)。植物鲜样在 105°C 条件下杀青 30 min, 之后在 65°C 条件下烘干至恒重, 烘干后称重, 即为植物地上和地下生物量。植物生物量收割后利用土钻采集土柱内 0—20 cm 土壤样品, 在室温下自然风干, 研磨、过 2 mm 土壤筛, 用于测定土壤基础理化性质。土壤含水量采用烘干法测定; 土壤 pH 和电导率分别采用 1:5 土水比电极法和电导法测定; 土壤有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化法测定; 土壤无机碳采用气量法测定。试验方法参考《土壤农业化学分析方法》^[24]。

2.4 数据处理

土壤总碳储量 $C(\text{kg}/\text{m}^2)$ 为土壤有机碳储量和土壤无机碳储量的总和, 其中土壤有机碳/无机碳储量根据土壤有机碳/无机碳含量、土壤容重及土层厚度乘积可得^[25]。总生物量碳储量 $C(\text{g}/\text{m}^2)$ 为地上生物量碳储量和地下生物量碳储量的总和, 其中地上生物量碳储量 $C(\text{g}/\text{m}^2) = \text{单位面积地上生物量} \times \text{相应部位碳含量}(0.436)$, 地下生物量碳储量 $C(\text{g}/\text{m}^2) = \text{单位面积地下生物量} \times \text{相应部位碳含量}(0.440)$, 各部位碳含量依据阜康试验站长期监测数据推算而得^[26-27]。生态系统碳储量 $C(\text{kg}/\text{m}^2) = \text{土壤总碳储量} + \text{总生物量碳储量}$ 。以不施脱硫石膏为对照, 碳储量绝对变化量 = 施加脱硫石膏处理碳储量 - 空白对照碳储量; 碳储量相对变化率 (%) = ((施加脱硫石膏处理碳储量 - 空白对照碳储量) / 空白对照碳储量) $\times 100\%$ 。

不同处理间的碳储量差异性采用最小显著差异法 (LSD) 进行比较。通过单一样本均值检验比较各处理组变化程度与零的显著性差异。数据经对数转换后部分试验数据仍不满足正态性分布, 遂采用 Spearman 相关分析研究不同环境因子对生态系统碳储量的影响。本研究的数据处理和分析均通过 IBM SPSS Statistics 25.0 软件实现, 采用 Origin 2017 软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 施加脱硫石膏对土壤碳储量的影响

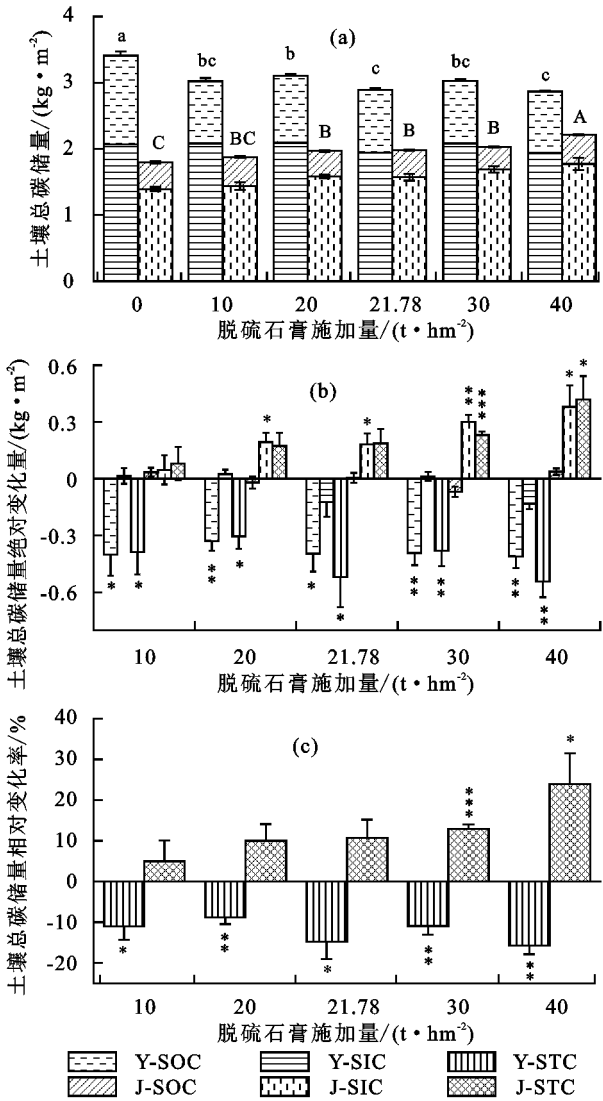
施用脱硫石膏降低盐土总碳储量, 增加碱土总碳储量 (图 2)。在不同施加量脱硫石膏处理下, 盐土总碳储量显著高于碱土总碳储量 ($P < 0.05$) (图 2a)。盐土中, 施用 10, 20, 21.78, 30, 40 t/hm^2 脱硫石膏土壤总碳储量 C 较对照分别降低 0.39, 0.30, 0.52, 0.38, 0.54 kg/m^2 (图 2b), 降幅为 11.05%, 8.78%, 14.84%, 10.96%, 15.72% (图 2c), 其中以土壤有机碳储量降低为主, 平均占土壤总碳储量降幅的 93.39%, 而施用脱硫石膏土壤无机碳储量无显著变化 ($P > 0.05$)。

与盐土相反, 施用脱硫石膏显著促进碱土碳固定, 且随施用量增加碱土总碳储量呈递增趋势 (图 2a)。碱土中, 施用 10, 20, 21.78, 30, 40 t/hm^2 脱硫石膏土壤总碳储量 C 较对照分别增加 0.08, 0.17, 0.19, 0.23, 0.42 kg/m^2 (图 2b), 增幅分别为 4.97%, 10.00%, 10.71%, 12.94%, 23.94% (图 2c), 其中以土壤无机碳储量增加为主, 平均占土壤总碳储量增幅的 97.44%, 而施用脱硫石膏碱土有机碳储量无显著变化 ($P > 0.05$)。整体而言, 高施加量 (30, 40 t/hm^2) 对盐碱土总碳储量影响更大。与供试土壤本底值相比, 施加脱硫石膏盐土总碳储量显著降低, 碱土总碳储量显著增加 ($P < 0.05$)。施加量 10~40 t/hm^2 处理盐土总碳储量 C 降低 0.18~0.41 kg/m^2 , 碱土总碳储量 C 增加 0.03~0.37 kg/m^2 。未施加脱硫石膏 (对照) 处理下盐土总碳储量 C 增加 0.13 kg/m^2 , 碱土总碳储量 C 降低 0.05 kg/m^2 , 且均表现为促进土壤有机碳累积, 而抑制土壤无机碳的积累。

3.2 施加脱硫石膏对生物量碳储量的影响

施用脱硫石膏后, 盐土与碱土总生物量碳储量变化特征呈相反趋势 (图 3)。盐土中, 施加脱硫石膏限制总生物量碳累积, 且随脱硫石膏施用量增加, 小麦总生物量碳储量呈先降低后升高的趋势 (图 3a)。与对照相比, 施用 10, 20, 21.78, 30, 40 t/hm^2 脱硫石膏总生物量碳储量 C 分别降低 5.07, 23.30, 32.68, 18.87, 17.35 g/m^2 , 其中地上生物量碳储量 C 较对照分别降低 6.00, 24.03, 33.08, 18.45, 17.87 g/m^2 (图

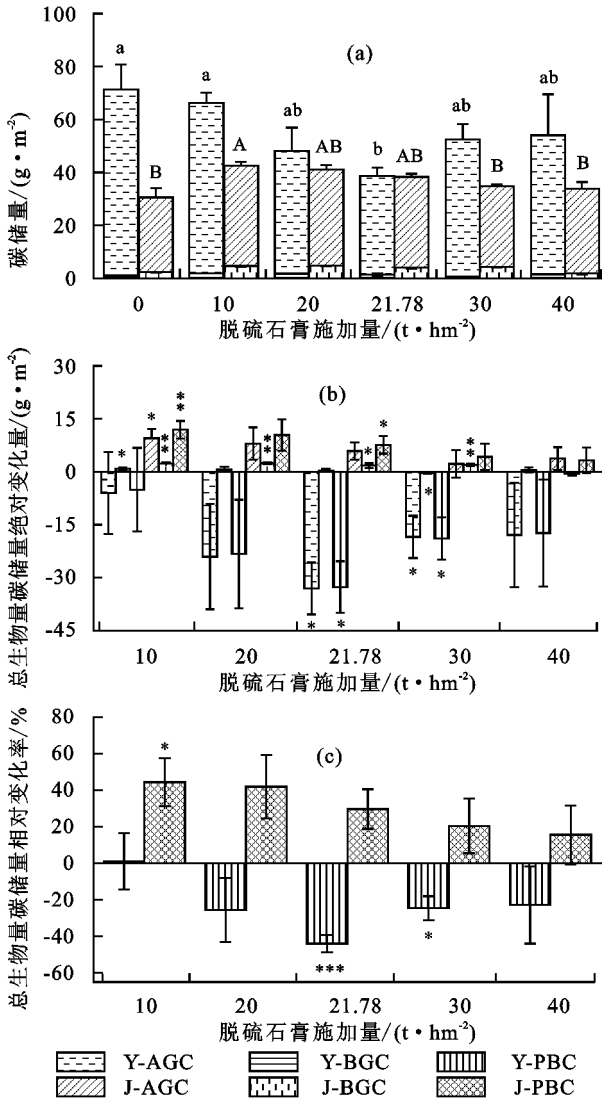
3b)。施加量 21.78,30 t/hm²处理总生物量碳储量显著降低($P<0.05$),降幅分别为 43.93%和 24.55%(图 3c)。整体上,盐土中小麦地上生物量碳对脱硫石膏施更加敏感,而地下生物量碳储量在处理后较对照无显著差异($P>0.05$)。



注:图中不同小写字母表示盐土中不同处理在 5%水平下差异,不同大写字母表示碱土中不同处理在 5%水平下差异;采用双侧检验;星号表示各处理组碳储量变化程度与零相比的统计学显著性,*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。误差线表示标准误;Y 为盐土;J 为碱土;SOC 为土壤有机碳;SIC 为土壤无机碳;STC 为土壤总碳。

图 2 不同施加量脱硫石膏处理下土壤碳储量变化

与盐土相反,施加脱硫石膏显著增加碱土小麦总生物量碳储量($P<0.05$),但随施用量增加促进效果逐渐减弱。与对照相比,施用 10,20,21.78,30,40 t/hm²脱硫石膏总生物量碳储量分别增加 11.92,10.45,7.67,4.27,3.25 g/m²(图 3b),增幅为 44.44%,41.99%,29.66%,20.50%,15.63%(图 3c)。碱土中小麦地上和地下生物量碳储量较对照均显著增加($P<0.05$),但以地上生物量碳变化为主,约占总生物量碳储量增幅的 78.40%。



注:图中不同小写字母表示盐土中不同处理在 5%水平下差异,不同大写字母表示碱土中不同处理在 5%水平下差异。图中星号表示各处理组碳储量变化程度与零相比的统计学显著性,*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。误差线表示标准误。Y 为盐土;J 为碱土;AGC 为地上生物量碳;BGC 为地下生物量碳;PBC 为总生物量碳。

图 3 不同施加量脱硫石膏处理下生物量碳储量变化

3.3 施加脱硫石膏对生态系统碳储量的影响

施加脱硫石膏盐土和碱土生态系统碳储量变化特征呈相反趋势,但均以土壤固碳形式为主(图 4a)。施加脱硫石膏盐土生态系统碳储量显著降低($P<0.05$),其中施加量 10,20,21.78,30,40 t/hm²处理盐土生态系统碳储量 C 较对照分别降低 0.39,0.33,0.55,0.40,0.56 kg/m²(图 4b)。施加脱硫石膏碱土生态系统碳储量显著增加($P<0.05$),且随脱硫石膏施用量增加呈递增趋势(图 4b),施加量 10,20,22,30,40 t/hm²处理碱土生态系统碳储量 C 较对照分别增加 0.09,0.18,0.19,0.24,0.42 kg/m²。整体而言,脱硫石膏高施加量(30,40 t/hm²)对盐土和碱土生态系统碳储量的影响作用大于其他脱硫石膏施加量处理。

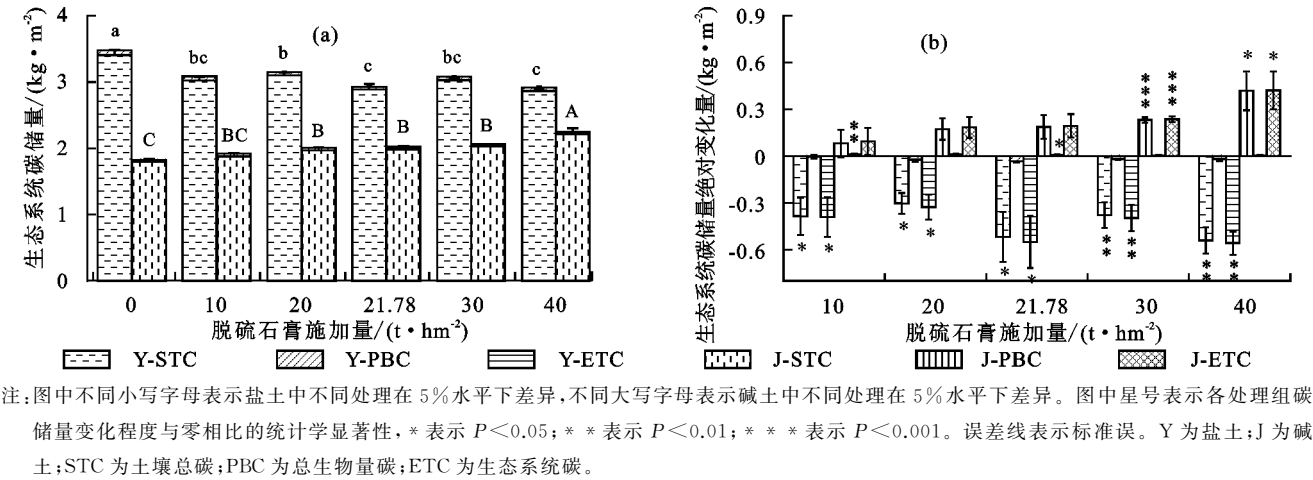


图4 不同施加量脱硫石膏处理下生态系统碳储量变化

3.4 盐碱土碳储量变化与环境因子的关系

不同施加量脱硫石膏处理盐土和碱土基础理化特征见表2。盐土中,与对照相比,施加脱硫石膏土壤电导率显著增加,土壤含水量大幅降低,土壤pH变化不显著。施加10~40 t/hm²脱硫石膏土壤电导率平均增加0.85 mS/cm;土壤含水量在低中施加量(10,21.78 t/hm²)处理显著降低($P<0.05$),而在高施加量处理下降低不显著。碱土中,与对照相比,施加脱硫石膏土壤pH显著降低,土壤含水量和土壤电导率均显著增加($P<0.05$)。土壤pH随脱硫石膏施用量增加而降低,降幅为9.88%~13.39%;土壤含水量在中施加量(20,21.78 t/hm²)处理下显著

增加($P<0.05$),在其余3个施加量处理下无显著变化;土壤电导率随脱硫石膏施加量增加而增加,各处理较对照平均增加0.87 mS/cm。

相关性分析发现,盐土生态系统碳储量变化、土壤总碳储量变化与相应的土壤含水量变化呈显著正相关,与土壤电导率呈显著负相关;总生物量碳储量变化与脱硫石膏施加量呈微弱的负相关(表3)。碱土生态系统碳储量变化与脱硫石膏施加量、土壤电导率呈显著正相关(表4),土壤总碳储量变化和环境因子的相关性与生态系统碳储量变化一致;总生物量碳储量变化与脱硫石膏施加量和土壤电导率呈显著负相关。

表2 不同施加量脱硫石膏处理下土壤基础理化性质

施加量/ (t·hm ⁻²)	含水量/%		pH		电导率/(mS·cm ⁻¹)	
	盐土	碱土	盐土	碱土	盐土	碱土
0	19.32±0.70a	14.42±0.45B	7.90±0.04a	9.11±0.05A	1.98±0.11c	0.28±0.01D
10	16.85±0.37b	15.20±0.31AB	7.97±0.02a	8.21±0.08B	2.38±0.15bc	0.69±0.04C
20	15.38±0.91b	16.39±0.39A	8.00±0.03a	7.93±0.03C	2.66±0.13b	1.12±0.05B
21.78	15.89±0.60b	16.33±0.36A	7.97±0.06a	7.94±0.06C	3.28±0.19a	1.23±0.08B
30	17.82±0.29ab	15.59±0.73AB	7.97±0.03a	7.93±0.03C	2.72±0.08b	1.16±0.07B
40	17.77±0.55ab	15.50±0.44AB	7.96±0.03a	7.89±0.05C	3.12±0.16ab	1.58±0.07A

注:表中数据为平均值±标准误;不同小写字母表示盐土中不同处理在5%水平下差异;不同大写字母表示碱土中不同处理在5%水平下差异。

表3 盐土碳储量变化与环境因子相关关系

项目	生态系统碳 储量变化	土壤总碳 储量变化	土壤有机碳 储量变化	土壤无机碳 储量变化	总生物量碳 储量变化	地上生物量 碳储量变化	地下生物量 碳储量变化
施加量	-0.34	-0.31	-0.07	-0.42*	-0.16	-0.16	-0.38
土壤含水量变化	0.50*	0.54**	0.58**	0.18	0.21	0.21	-0.33
土壤pH变化	<0.01	-0.03	-0.11	0.06	0.12	0.13	0.44*
土壤电导率变化	0.63**	-0.63**	-0.52**	-0.57**	-0.17	-0.19	0.25
土壤含水量	-0.10	-0.06	<0.01	-0.17	0.07	0.09	-0.55**
土壤pH	0.30	0.28	0.27	0.12	0.19	0.21	0.24
土壤电导率	-0.45*	-0.45*	-0.22	-0.65**	-0.09	-0.10	0.12

注:*表示相关性达显著水平($P<0.05$);**表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。下同。

表 4 碱土碳储量变化与环境因子相关关系

项目	生态系统碳 储量变化	土壤总碳 储量变化	土壤有机碳 储量变化	土壤无机碳 储量变化	总生物量碳 储量变化	地上生物量 碳储量变化	地下生物量 碳储量变化
施加量	0.52* *	0.52* *	-0.10	0.51* *	-0.42*	-0.37	-0.61* *
土壤含水量变化	-0.18	-0.19	-0.30	-0.16	0.23	0.21	-0.12
土壤 pH 变化	-0.07	-0.07	0.30	-0.09	0.10	0.08	0.31
土壤电导率变化	0.46*	0.47*	0.03	0.38	-0.35	-0.32	-0.56* *
土壤含水量	0.07	0.07	-0.17	0.11	0.13	0.14	0.18
土壤 pH	-0.29	-0.30	0.06	-0.21	0.33	0.35	0.14
土壤电导率	0.45*	0.46*	0.07	0.37	-0.41*	-0.38	-0.54* *

4 讨论

本研究发现,施加脱硫石膏到盐土和碱土中,引起的土壤碳储量变化趋势和相应的碳组成变化不同,施加脱硫石膏后盐土总碳储量显著降低且以土壤有机碳变化为主,碱土总碳储量显著增加且以土壤无机碳变化为主(图 2)。研究结果说明,施加脱硫石膏对盐碱土碳固定作用与土壤受盐碱胁迫程度有关,前人^[28-29]的研究结果也证实了这点。未施加脱硫石膏处理下,即单独灌溉有利于减缓土壤盐碱胁迫(表 1、表 2),促进作物生长发育,从而增加生态系统碳输入量。而相较于对照,施加脱硫石膏显著增加土壤离子含量($P<0.05$),即电导率(表 2),从而增强盐分胁迫,限制植物根系生长发育,降低向土壤中的有机碳输入量^[13]。Tao 等^[30]关于脱硫石膏对盐渍化土壤盐分和养分含量影响结果也表明此结论。相关分析结果显示,盐土有机碳储量变化与土壤含水量变化呈极显著正相关(表 3),主要是因为随着土壤含水量降低,植物总生物量减少^[31],进而减少向土壤系统中的有机碳输入量,限制土壤有机碳累积。脱硫石膏溶解释放出的 Ca^{2+} 易于碱土中富积的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 结合,从而以碳酸钙沉淀方式贮存在土壤中,促进以难溶性碳酸盐形式主导的土壤无机碳固存过程^[12]。相关研究^[12] 也表明,随着土壤碱性盐(CO_3^{2-} 和 HCO_3^-)的逐渐消耗,土壤与空气形成更大的气体分压差,促使大气 CO_2 不断溶于土壤溶液形成碳酸盐,进一步扩大土壤无机碳汇量。此外,脱硫石膏施加量与碱土无机碳储量增加呈极显著正相关(表 4),且施加量 40 t/hm^2 处理下仍未达到土壤无机碳饱和,表明在保障外来钙源前提下,碱性盐基含量是限制盐碱土改良过程中固碳能力的核心,未来在估算该背景下生态系统碳储量时应考虑土壤初始碱性盐基离子浓度。本研究也发现,未施加脱硫石膏处理下,盐土和碱土无机碳储量较土壤本底值均呈下降趋势,可能是由于在灌溉过程中部分碳以可溶性无机碳形式淋溶

到地下水中。解怀亮等^[32] 研究也表明,干旱区灌溉过程中小麦无机碳年均淋溶量为 $3.92\sim5.88\text{ g/m}^2$ 。由于土壤可溶性无机碳储量较低,且其碳聚积的周转时间较缓慢^[20],本研究未考虑施加脱硫石膏对可溶性无机碳储量的影响。

相较土壤碳库,植被碳库作为生态系统碳截存能力的重要特征之一,由于更易在较短时间内快速调节,对生态系统碳平衡具有重要调控作用^[33]。因此,在研究施加脱硫石膏对盐碱土碳储量的影响时,应考虑植被生物量碳储量的响应。本研究发现,施加脱硫石膏后盐土中小麦总生物量碳储量显著降低,碱土总生物量碳储量显著增加,该差异可能与脱硫石膏添加引起的土壤含水量变化及其土壤自身盐碱属性有关(表 2)。施加脱硫石膏后,盐土含水量显著降低,可能引发水分胁迫,降低植物根际水分利用效率,最终表现为作物减产和生物量碳汇限制。乐章燕等^[31] 研究也表明,水分胁迫是导致作物减产的重要原因。施加脱硫石膏后碱土含水量较对照显著增加,可能是由于脱硫石膏溶解释放出的 Ca^{2+} 增强土壤颗粒间胶结力,促进土壤团聚体结构形成,从而提高土壤含水量,促进植物生长^[18]。对于盐土来说,添加脱硫石膏相当于增加土壤盐分,因此会显著抑制作物生物量碳储量^[13]。本研究中,碱土中小麦总生物量碳储量变化和地下生物量碳储量变化与脱硫石膏施加量呈显著负相关(表 4)表明,施用量过多会抑制生物量碳累积。王金满等^[34] 也发现,施加脱硫石膏会抑制向日葵苗期的生长。可能原因是高施用量导致土壤酶活性下降,限制土壤系统代谢高效进行,从而降低土壤肥力,影响植物幼苗的生长发育^[34]。

本研究结果表明,施加 $10\sim40\text{ t/hm}^2$ 脱硫石膏后盐土生态系统碳储量 C 较对照平均降低 0.45 kg/m^2 ,其中以土壤有机碳储量下降为主;碱土系统碳储量 C 较对照平均增加 0.23 kg/m^2 ,其中以土壤无机碳储量增加为主(图 4);结合高施加量($30, 40\text{ t/hm}^2$)对盐土和碱土生态系统碳储量的影响作用大于

其他脱硫石膏施加量处理,说明施用脱硫石膏对盐碱土的碳固定作用与土壤受盐碱胁迫程度有关。施加脱硫石膏后盐土和碱土生态系统碳储量变化特征与相应的土壤总碳储量变化趋势相同,且针对脱硫石膏施加量和相关土壤环境因子对盐碱土土壤生态系统碳储量的影响,与施加脱硫石膏引起的土壤总碳储量变化具有一致性(表 3 和表 4),说明施用脱硫石膏对盐碱土碳固定的影响主要通过改变土壤离子组成,间接影响生态系统碳储量。

本研究以模拟小麦种植试验结果为基础,讨论脱硫石膏改良盐碱地过程中生态系统碳固定潜力。由于试验周期较短,改良过程对盐碱土壤增产、稳产和增汇的效果有待更长试验周期的探究。今后的研究应加强对不同作物盐碱土生态系统碳收益的评价,在考虑限制性钙离子供给基础上,原状土壤受盐碱胁迫程度也需作为重要考量指标。

5 结 论

施用脱硫石膏有利于碱土生态系统碳的累积,而抑制盐土生态系统碳的积累。生态系统碳组分的响应也依据土壤受盐碱胁迫程度存在差异,其中碱土以土壤无机碳储量增加为主,盐土以土壤有机碳储量降低为主。影响干旱区盐碱土改良过程中生态系统碳储量变化的主要因素是脱硫石膏施加量、土壤电导率和由脱硫石膏施加引起的土壤含水量变化量,其中施加量 30,40 t/hm² 处理对盐碱土生态系统碳储量影响效果最大。本文结果说明在研究盐碱土生态系统碳固定潜力时,在满足干旱区限制性钙源供给充足的前提下,土壤受盐碱胁迫程度也需作为重要评价指标。

参考文献:

[1] 张万银,郑旭,李斌,等.基于 CNKI 数据库对新疆盐碱地治理研究现状与分析[J].农业与技术,2020,40(9):96-97.

[2] 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(1):82-92.

[3] 崔媛,张强,王斌,等.脱硫石膏对重度苏打盐化土中主要离子淋洗的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):310-314.

[4] 石婧,黄超,刘娟,等.脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J].环境工程学报,2018,12(6):1800-1807.

[5] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J].Geoderma,2019,352(1):13-21.

[6] 王丹,黄超,李小东,等.脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):34-40.

[7] 樊丽琴,杨建国,尚红莺,等.脱硫石膏施用下宁夏盐化碱土水盐运移特征[J].水土保持学报,2017,31(3):193-196.

[8] Paradelo R, Virto I, Chenu C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2015,202(1):98-107.

[9] 刘军会,高吉喜,王文杰,等.我国典型陆地生态系统固碳重要区范围界定[J].环境科学研究,2016,29(12):1782-1789.

[10] 李彦,王玉刚,唐立松.重新被“激活”的土壤无机碳研究[J].土壤学报,2016,53(4):845-849.

[11] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.

[12] Wang J Y, Wang X J, Wang J P. Profile distribution of CO₂ in an arid saline-alkali soil with gypsum and wheat straw amendments: A two-year incubation experiment[J/OL].Scientific Reports,2018,8(1):11939. doi:10.1038/s41598-018-30312-0.

[13] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J].Soil Biology Biochemistry,2015,81(1):108-123.

[14] Yu H L, Yang P L, Lin H, et al. Effects of sodic soil reclamation using flue gas desulphurization gypsum on soil pore characteristics, bulk density, and saturated hydraulic conductivity[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(4):1201-1213.

[15] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,1998,51(2):123-137.

[16] O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, et al. Edaphic controls on soil organic carbon stocks in restored grasslands[J].Geoderma,2015,251(1):117-123.

[17] 赵辉,杨涓,腾迎凤,等.脱硫渣废弃物对盐碱地油葵根际微生物数量及土壤酶活性的影响[J].生态环境学报,2010,19(11):2718-2721.

[18] Tao J, Wu L H, Gu W, et al. Effects of continuous application flue-gas desulfurization gypsum and brackish ice on soil chemical properties and maize growth in a saline soil in coastal area of China[J].Soil Science and Plant Nutrition,2019,65(1):82-89.

[19] Wong V N L, Dalal R C, Greene R S B. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation[J].Applied Soil Ecology,2009,41(1):29-40.

[20] 王玉刚,王忠媛,李彦.干旱区盐碱土剖面无机碳组分

- 分布特征[J].干旱区地理,2013,36(4):631-636.
- [21] Daliakopoulos I N, Tsanis I K, Koutroulis A, et al. The threat of soil salinity: A European scale review[J].Science of the Total Environment,2016,573(1):727-739.
- [22] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土[M].1 版.北京:科学出版社,1993.
- [23] 潘根兴.中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J].科技通报,1999,15(5):330-332.
- [24] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].1 版.北京:中国农业科技出版社,1999.
- [25] 张珍明,周运超,黄先飞,等.喀斯特小流域土壤有机碳密度及碳储量空间分布异质性[J].水土保持学报,2017,31(2):184-190,214.
- [26] 寇太记,于伟伟,朱建国,等.臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响[J].环境科学,2012,33(8):2862-2867.
- [27] 苗惠田,吕家珑,张文菊,等.潮土小麦碳氮含量对长期不同施肥模式的响应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):72-80.
- [28] 邹璐,范秀华,孙兆军,等.盐碱地施用脱硫石膏对土壤养分及油葵光合特性的影响[J].应用与环境生物学报,2012,18(4):575-581.
- [29] Li M, Jiang L L, Sun Z J, et al. Effects of flue gas desulfurization gypsum by-products on microbial biomass and community structure in alkaline-saline soils[J].Journal of Soils and Sediments,2012,12(7):1040-1053.
- [30] Tao J, Wu L H, Liu X J, et al. Effect of brackish ice on salt and nutrient contents of saline soil in flue-gas desulfurization gypsum amended, raised bed agroecosystem[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(5):1734-1740.
- [31] 乐章燕,廖荣伟,刘晶森,等.水分胁迫对华北平原冬小麦地上部分及产量的影响[J].气象与环境学报,2014,30(6):120-124.
- [32] 解怀亮,王玉刚,李彦.干旱区灌溉过程中碳淋溶试验研究[J].干旱区研究,2015,32(5):903-909.
- [33] 张蕊,赵钰,何红波,等.基于稳定碳同位素技术研究大气 CO₂ 浓度升高对植物—土壤系统碳循环的影响[J].应用生态学报,2017,28(7):2379-2388.
- [34] 王金满,杨培岭,张建国,等.脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J].农业工程学报,2005,21(9):33-37.
- (上接第 352 页)
- [17] 王宁,南宏宇,冯克云.化肥减量配施有机肥对棉田土壤微生物生物量、酶活性和棉花产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):173-181.
- [18] 肖琼,王齐齐,邬磊,等.施肥对中国农田土壤微生物群落结构与酶活性影响的整合分析[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1598-1609.
- [19] 范森珍,尹昌,范分良,等.长期不同施肥对红壤碳、氮、磷循环相关酶活性的影响[J].应用生态学报,2015,26(3):833-838.
- [20] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J].Soil Biology and Biochemistry,2005,37(5):937-944.
- [21] Jian S Y, Li J W, Chen J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis[J].Soil Biology and Biochemistry,2016,101:32-43.
- [22] Rodrigues J L M, Pellizari V H, Mueller R, et al. Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2013,110(3):988-993.
- [23] Hartmann M, Frey B, Mayer J, et al. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming[J].ISME Journal,2015,9(5):1177-1194.
- [24] Cui H Y, Sun W, Delgado-Baquerizo M, et al. Phosphorus addition regulates the responses of soil multifunctionality to nitrogen over-fertilization in a temperate grassland[J/OL]. Plant and Soil; 1-15 [2020-10-15].<https://doi.org/10.1007/s11104-020-04620-2>.
- [25] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, et al. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems[J].Nature Communications,2016,7(1):1857-1861.
- [26] Jiang Y J, Jin C, Sun B. Soil aggregate stratification of nematodes and ammonia oxidizers affects nitrification in an acid soil[J].Environmental Microbiology,2014,16(10):3083-3094.