

外源盐对盐碱土壤 CO₂ 吸收的影响

刘立家, 焦燕, 杨文柱, 杨洁, 于俊霞

内蒙古自治区环境化学重点实验室, 内蒙古师范大学 化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022

摘要: 为探明盐碱土壤 CO₂ 吸收机理及影响因素, 通过室内实验, 利用外源盐调节土壤电导率 (electrical conductivity, EC), 探究盐碱土壤 CO₂ 吸收速率的变化趋势、累积吸收量和土壤 EC 之间的关系。结果表明: 培养期间, 土壤样品在 36 h 出现吸收现象, 且 EC 值高的土壤达到 CO₂ 吸收速率峰值时间短。回归分析显示, 土壤 CO₂ 累积吸收量随 EC 增加而增加 ($R^2=0.8637$)。单因素方差分析发现, 不同电导率土壤, CO₂ 累积吸收量均具有显著差异 ($p<0.001$)。土壤 EC 是影响盐碱土壤 CO₂ 吸收变化的重要因素, 土壤 EC 值升高, 增加盐碱土壤对 CO₂ 的吸收速率和土壤 CO₂ 累积吸收量。

关键词: 盐碱土壤; EC; 土壤 CO₂ 吸收速率; 碳汇; 土壤 CO₂ 累积吸收量

Effect of exogenous salt on carbon dioxide (CO₂) absorption in saline-alkali soil

LIU Lijia, JIAO Yan, YANG Wenzhu, YANG Jie, YU Junxia

Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, College of Chemistry and Environmental Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

Abstract: Background, aim, and scope According to previous studies, it is suggested that the carbon pool lost by atmospheric CO₂ is likely to exist in widely distributed saline-alkali soils. The huge “carbon source” and “carbon sink” function of soil play an important role in the study of global carbon cycle. In order to discuss the carbon cycle process between atmosphere and soil, the variation trend of CO₂ uptake rate in different electrical conductivity (EC) soils and the relationship between cumulative uptake and soil EC were studied by regulating different EC soils for culture. **Materials and methods** KCl solution was added to regulate soil EC, and the soil mass water content in the culture system was controlled to 25%. Silica gel plug was used to seal the soil to be placed in SP-01 biochemical incubator at (25±1)°C for 216 h. The mass concentration of CO₂ was determined by meteorological chromatograph (Agilent-6820), and the working conditions of the instrument were set. **Results** (1) The higher the EC value of soil is, the shorter time it takes to reach the peak uptake value. After 168 h of culture, the

收稿日期: 2019-09-17; 录用日期: 2020-04-25; 网络出版: 2020-04-30

Received Date: 2019-09-17; Accepted Date: 2020-04-25; Online first: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41865010, 41675140); 2019 年内蒙古自治区高等学校青年科技英才领军人才 (NJYT-20-A04); 第十批内蒙古自治区草原英才 (2020); 2016 年内蒙古自治区青年创新人才计划项目

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41865010, 41675140); Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region (NJYT-20-A04); Project of Grassland Talent of Inner Mongolia Autonomous Region (2020); Inner Mongolia Youth Innovative Talent Training Program of Prairie Excellence Project (2016)

通信作者: 焦燕, E-mail: jiaoyan@imnu.edu.cn; 杨文柱, yangwzh@imnu.edu.cn

Corresponding Author: JIAO Yan, E-mail: jiaoyan@imnu.edu.cn; YANG Wenzhu, E-mail: yangwzh@imnu.edu.cn

引用格式: 刘立家, 焦燕, 杨文柱, 等. 2020. 外源盐对盐碱土壤 CO₂ 吸收的影响 [J]. 地球环境学报, 11(4): 429–434.

Citation: Liu L J, Jiao Y, Yang W Z, et al. 2020. Effect of exogenous salt on carbon dioxide (CO₂) absorption in saline-alkali soil [J]. Journal of Earth Environment, 11(4): 429–434.

CO₂ adsorption rate curve of soil became stable, and the value was close to 0 mg·kg⁻¹·h⁻¹. (2) The higher the soil EC, the higher the cumulative uptake of soil CO₂, and the stronger the soil CO₂ uptake. The cumulative uptake of CO₂ in soil increased linearly with the increase of EC. **Discussion** The experimental results of this study and the previous studies showed that the soil with high EC has potential carbon sequestration function. During the culture period, the uptake rate of CO₂ in soil exhibited different degrees of uptake properties. The uptake phenomenon appeared after 36 h of culture and tended to be stable after 168 h, and the value was close to 0 mg·kg⁻¹·h⁻¹. The results also showed that high EC soil has the function of absorbing CO₂. **Conclusions** Soil EC is an important factor to regulate the uptake rate of soil CO₂. The higher the EC, the shorter time for the soil to reach the peak value of CO₂ uptake. Through the study of the cumulative uptake of CO₂ in soil, it was found that the higher the saline-alkali soil with EC, the higher the uptake of CO₂ ($R^2=0.8637$). High EC is conducive to increasing the cumulative uptake of CO₂ in soil. **Recommendations and perspectives** The saline-alkali soil environment is changeable and complex, so it is necessary to further find out the mechanism of CO₂ uptake and the effect of soil carbon sequestration in saline-alkali soil, which also needs the comprehensive application of soil microorganism, geo-environmental chemistry and other fields. The paper is aimed to provide theoretical support for the follow-up researches.

Key words: saline-alkaline soil; EC; soil CO₂ uptake rate; carbon sink; cumulative uptake of CO₂ in soil

工业革命以来, 人类的生产生活方式很大程度上导致了温室气体的加速排放。目前公认的温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O, 对温室效应的总贡献率达 80%, 其中, CO₂ 是最重要的温室气体之一。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第五次评估报告显示, CO₂ 是对全球气候变暖贡献最大的气体; CO₂ 对全球温室效应的贡献率约为 60% (张晓华等, 2014)。随着大气-土壤碳循环理论的发展, 土壤参与碳循环也慢慢进入研究者的视线。世界上大约 7% 的土地正面临盐碱化的威胁, 盐碱土壤面积的不断增长, 使得盐碱土壤碳汇的研究具有重要价值 (Li et al, 2014)。在我国北方, 内陆干旱区土壤盐碱化程度高、分布面积广, 盐碱土壤大气碳循环理论的探究越来越受关注。

2008 年, Science 期刊综合报导了我国新疆碱土和美国莫哈韦盐生沙漠吸收 CO₂ 的现象, Stone (2008) 发现大气 CO₂ 丢失的碳库很可能存在于分布广泛的、内陆干旱区盐碱土壤中。土壤 CO₂ 排放和吸收是一个日出夜进的“无机呼吸”过程, 这个过程在广义干旱、盐碱土区普遍存在 (李彦等, 2016)。Carmi et al (2019) 研究发现, 通过对土壤中可溶性无机碳 (DIC) 的碳同位素数据, 发现碳酸盐中的碳来源于大气。Xie et al (2009) 研究表明, 土壤无机 CO₂ 吸收过程很可能是地球上分布广泛的盐碱土壤都存在的自然过程, 盐碱

土壤无机碳汇能够主导或暂时主导土壤碳汇。

当前, 国内关于盐碱土壤碳循环的研究大多集中于新疆地区, 而对于内蒙古河套灌区盐碱土壤的研究较少, 关于盐碱土壤碳汇的观测和研究论文也鲜有报导。内蒙古河套灌区盐碱土壤面积约占内蒙古盐碱土壤面积的一半以上, 科学估算盐碱土壤无机碳汇具有较大潜力 (温慧洋等, 2016)。另外, 由于野外条件下存在诸多不可控因素, 土壤含盐量与电导率 (EC) 之间具有良好的线性相关性, EC 可以反映土壤含盐量的性质, 可以在实验室通过控制土壤含盐量调控土壤 EC (王境坤, 2015)。因此, 该研究设置不同 EC 土壤, 控制单一变量进行培养实验, 探究不同 EC 土壤 CO₂ 吸收速率变化趋势、累积吸收量和土壤 EC 之间的关系, 以期深入探讨大气-盐碱土壤碳循环过程, 为不同盐碱程度土壤减缓温室气体排放提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

土壤样品取自内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗, 该地区位于我国黄河中上游内蒙古段冲积平原, 常年干旱少雨, 日照充足, 属中温带大陆性气候, 年平均气温 7.7℃。年平均日照时间 3212.5 h。降水集中于 7—8 月, 年平均降水量 213.5 mm, 年蒸发量 1900—2300 mm (杨劲松,

2008; 刘秉旺等, 2012)。盐碱土地面积约占内蒙古盐渍化面积的 57.23% (刘沙滨等, 2001)。土壤由第四纪沙湖相红棕色黏土组成。

1.2 样品采集

采样时间为 2018 年 7 月, 采样地点选择在地势平坦的裸地 (无生长作物), 利用便捷式电导率仪 (Diret Soil EC Meter 2265FSTP) 对试验区域进行选点定位, 选取 EC 为 $1.5 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的土壤, 按照临近原则布置 3 个样点, 每个样点取 0—20 cm 表层土壤, 重复取样 3 次, 土样混合后, 取约 3 kg 土壤, 去除碎石、秸秆, 使用无菌聚乙烯自封袋带回实验室, 后经风干、磨碎、过 2 mm 筛, 用于

室内培养实验和土壤理化性质的测定。

1.3 土壤基本理化性质测定

土壤理化性质测定内容与方法: pH 值利用 pH Meter 型 pH 仪测定 (水土质量比 5 : 1); EC 采用 METTLER TOLEDO-FE38 型电导率仪测定 (水土质量比 5 : 1); 可溶性无机碳 (SDIC) 采用双指示剂中和滴定法测定; 难溶性无机碳 (SIC) 采用气量法测定; 土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾 - 外加热法测定; 土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 使用纳氏试剂比色法测定, 土壤硝态氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 使用紫外分光光度法测定。土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil from sample area

| 样地 | Sample area | pH | EC/($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$) | SDIC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | SIC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | SOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | $\text{NH}_4^+ / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ | $\text{NO}_3^- / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ |
|----|-------------|-----------------|---|--|---|---|---|---|
| S | | 8.22 ± 0.80 | 1.43 ± 0.25 | 0.15 ± 0.02 | 58.61 ± 1.28 | 1.39 ± 0.23 | 8.63 ± 0.20 | 4.25 ± 0.21 |

1.4 室内培养实验

称取风干、磨碎、过筛的土壤 50 g, 置于 250 mL 的钠钙玻璃制培养瓶中, 加入 5 mL 去离子水, 进行 7 d 的预培养, 激活土壤微生物。7 d 后将培养瓶取出, 测得土壤 pH 值为 8.10 ± 0.20 , 添加 KCl 溶液调节土壤 EC (表 2), 并调控培养体系土壤质量含水量为 25%, 使用硅胶塞封口, 放置于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ SP-01 型生化培养箱内避光培养 216 h。每个处理均设置 3 组平行。培养第 6 h, 第一次抽取气体, 之后, 每 12 h 取一次气体样, 120 h 后, 每 24 h 抽取一次气体。气体样品使用气相色谱仪 (Agilent-6820) 测定 CO₂ 质量浓度, 仪器工作条件设定为: 柱温 55°C , 进样口温度 130°C , 检测器温度 250°C , 载气 (氮气) 流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、FID 氢气流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, FID 空气流速 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

表 2 外加 KCl 调节土壤 EC
Tab.2 Regulation of soil EC by adding KCl

| 土壤编号 | EC |
|-------------|---------------------------------------|
| Soil number | /($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$) |
| S1 | 1.5 |
| S2 | 10.0 |
| S3 | 20.0 |
| S4 | 40.0 |
| S5 | 80.0 |

1.5 数据分析

土壤 CO₂ 累积吸收量:

$$C_{i+1} = C_i + [(F_i + F_{i+1})/2] \times \Delta t \quad (1)$$

式中: C_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次取样期间 CO₂ 累积吸收量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); F_i 和 F_{i+1} 分别是第 i 次和第 $i+1$ 次取样期间 CO₂ 吸收速率 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); Δt 为两次测定时间间隔。

土壤 CO₂ 吸收速率:

$$F = \frac{\frac{273}{273+T} \times V \times M \times \Delta C}{t \times m \times 22.4 \times 1000} \quad (2)$$

式中: F 为土壤 CO₂ 吸收速率 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); V 为培养瓶上方气体体积 (mL); ΔC 为单位时间内气体浓度变化值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); M 为 CO₂ 摩尔质量 ($44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); T 为生化培养箱内温度 (25°C); t 为培养时间 (h); m 为培养瓶中土样质量 (50 g); 22.4 为标准状态 CO₂ 气体摩尔体积 ($22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

采用 Origin 2018 64Bit、Excel 2016 软件进行制图和数据处理, SPSS Statistics 17.0 统计软件进行单因素方差分析 (ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同 EC 土壤 CO₂ 吸收速率变化趋势

培养 0—24 h, 不同 EC 水平的土壤 CO₂ 吸收速率均表现为正值 (图 1), 在培养 6 h 时, 出现峰值。未用 KCl 溶液调节 EC 的土壤 S1 (EC = $1.5 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$) CO₂ 吸收速率在培养 6 h 时, 表现出最强排放通量 $8.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同 EC 水平土

壤在培养 36 h 出现吸收现象, 土壤 S1—S5 (EC: 1.5 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、10.0 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、20.0 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、40.0 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、80.0 $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$) CO_2 吸收速率分别为 $-0.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $-1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $-1.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $-1.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $-2.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在培养 36—168 h, 不同 EC 水平土壤 CO_2 吸收速率以吸收特征为主。不同 EC 水平土壤达到吸收峰值的时间分别

为: S1 在 120 h 达到峰值 $-2.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, S2 在 144 h 达到峰值 $-1.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, S3 在 84 h 达到峰值 $-3.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, S4 在 72 h 达到峰值 $-2.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, S5 在 36 h 达到峰值 $-2.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。各组土壤 CO_2 吸收速率达到吸收峰值时间点显示: 土壤 EC 值越高, 达到吸收峰值时间越快。培养 168 h 后, 土壤 CO_2 吸收速率曲线趋于稳定, 数值接近 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

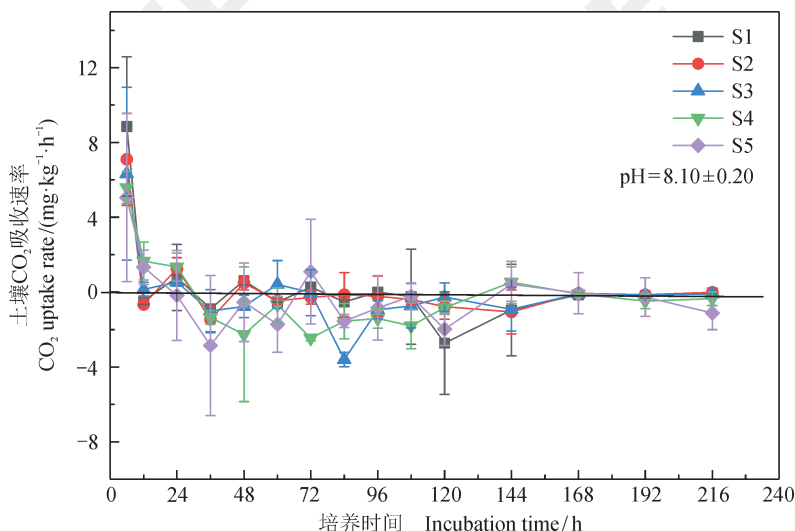


图 1 不同 EC 水平土壤 CO_2 吸收速率随培养时间变化特征
Fig.1 Variation of CO_2 uptake rate in different EC soils with culture time

2.2 土壤 EC 和土壤 CO_2 累积吸收量的关系

不同 EC 水平土壤 CO_2 累积吸收量之间呈现显著差异 ($p < 0.001$), 土壤 EC 越高, 土壤 CO_2 累积吸收量越高, 土壤 CO_2 吸收越强 (图 2)。S1—S5 土壤 CO_2 累积吸收量依次增加, 分别为 $-12.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-30.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-46.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-74.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-85.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤 CO_2 累积吸收量和土壤 EC 回归分析 ($R^2 = 0.8637$) 显示: 不同 EC 水平土壤均表现吸收特征, 土壤 CO_2 累积吸收量随土壤 EC 增加呈线性增加趋势 (图 3)。

3 讨论

土壤 CO_2 吸收受土壤温度、土壤含水量、气温等因素影响。该培养实验设置培养体系温度为 25°C , 旨在模拟野外盐碱土壤环境, 排除野外温度变化影响; 设置土壤含水量为 25%, 旨在模拟野外原位测定土壤质量含水量, 排除因降水或空气湿度变化的影响, 探究土壤 EC 对土壤 CO_2 吸

收的影响。该研究用 KCl 调控设定不同 EC 水平土壤的培养过程显示, 土壤 EC 越高, 土壤 CO_2 吸收速率达到峰值时间越快 (图 2)。随着土壤 EC 增加, 土壤吸收 CO_2 的能力增强。法科宇等 (2018) 研究反常的碳过程及其可能的驱动机制, 认为荒漠土壤客观存在吸收大气 CO_2 现象。王忠媛等 (2013) 发现高盐度或碱度对土壤 CO_2 吸收强度具有显著的正向影响, 与本文研究结果一致, 土壤高 EC 含量增强土壤 CO_2 吸收。自然条件下, 盐碱土壤表现出明显吸收 CO_2 的现象, 盐碱土壤 CO_2 日平均吸收速率为 $0.3\text{--}3.01 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Xie et al, 2009)。

培养期间, 不同 EC 土壤 CO_2 吸收速率表现不同吸收特征。培养 36 h 后, 出现吸收现象, 168 h 后趋于稳定。当土壤 CO_2 吸收达到饱和状态, 或土壤微生物生命活动作用下, CO_2 排放与土壤培养体系 CO_2 吸收作用达到平衡, 吸收速率接近 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同 EC 土壤 CO_2 累积吸收量显示, S1—S5 均表现出吸收特征。王忠媛等

(2013) 通过灭菌方法, 拆分土壤 CO₂ 通量为土壤无机 CO₂ 通量和有机 CO₂ 通量, 灭菌处理未改变土壤理化性质, 通过高温使土壤中的微生物、酶和根系失活, 消除了土壤有机 CO₂ 通量的源, 其结果表明: 土壤无机非生物吸收过程很可能是地球上分布广泛的盐碱土壤都存在的自然过程。盐碱土壤无机碳汇能够主导或暂时主导土壤碳汇 (Xie et al, 2009)。Carmi et al (2019) 发现土壤无机碳 (SDIC) 是干旱半干旱区土壤的重要组成部分。pH 值 7 以上的盐碱土壤具有吸收 CO₂ 的功能, 通过同位素示踪发现 SDIC 来源于大气 CO₂, 该研究结果可解释部分土壤碳汇效应机理。Duiker and Lal (1999) 研究表明, 盐碱土壤系统对碳酸盐具有较强的溶蚀作用, 溶蚀作用越强, 消耗土壤 CO₂ 越多, 能够减少土壤向大气释放 CO₂, 从而增强盐碱土壤碳汇效应。Liu et al (2015) 在毛乌素沙地研究发现, 土壤吸收 ¹³CO₂ 后, ¹³C 可能在土壤固相中富集, 表明土壤吸收的碳有可能转变为碳酸盐, 并形成碳汇。Matter et al (2016) 和 McGrail et al (2017) 向玄武岩矿井中注入 CO₂, 2 年内生成了大量碳酸盐结核, 固定了 95% 注入的碳, 认为这种具备固碳效应的碳酸盐结核的快速形成过程, 可能归因于玄武岩溶解 (额外提供了大量 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等)、碱性水注入、新式注入碳手段和原生 / 次生碳酸盐溶解过程。法科宇等 (2018) 研究碳酸盐结核形成过程, 对探索“荒漠土壤吸收的碳可能矿化为碳酸盐”具有借鉴意义。综合已有研究, 表明高 EC 土壤具有吸收 CO₂ 的潜力, 与本文培养实验的结果一致。

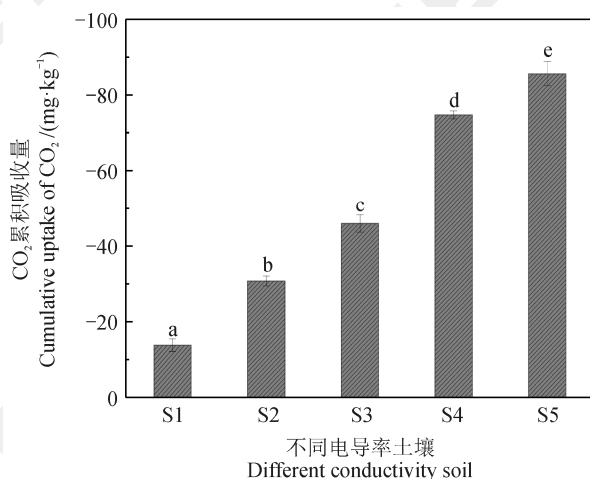


图2 不同 EC 水平土壤 CO₂ 累积吸收量

Fig.2 Cumulative uptake of CO₂ in the soils with different EC

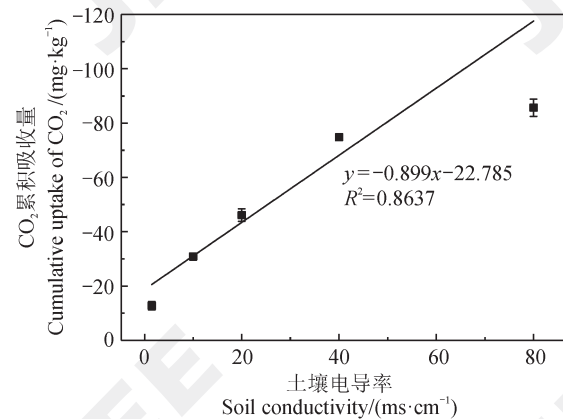


图3 土壤 CO₂ 累积吸收量和土壤 EC 的关系

Fig.3 The relationship between the cumulative uptake of soil CO₂ and the EC of soil.

土壤吸收的 CO₂ 可能经过漫长的时间形成碳酸盐, 固存在土壤中, CO₂ “矿化作用”可能是地球表层岩石与土壤固存 CO₂ 的一个缩影。因此, 碳酸盐对盐碱土壤碳汇效应的研究将是土壤碳汇研究的一个重要方向。刘再华 (2001) 将土壤 CO₂ 通量分为土壤有机 CO₂ 通量和无机 CO₂ 通量, 土壤微生物能够分泌胞外碳酸酐酶 (CA) 并催化 CO₂ 和 HCO₃⁻ 之间的可逆转换: CO₂+H₂O→HCO₃⁻+H⁺, 使其反应速率提高 10⁹ 倍, 转化数高达 10⁴—10⁶ 倍, 为生物作用在全球碳循环中“碳失汇”重新评价提供了理论依据。关于盐碱土壤微生物能否分泌胞外碳酸酐酶并催化 CO₂ 和 HCO₃⁻ 之间的逆转, 以及不同 EC 环境微生物特征还需要更深层次的微生物实验探究。杨文柱等 (2019) 研究盐碱土壤温室气体占比数据的精确估算还需要更多实验数据加以验证。合理调控土壤盐含量, 提高农业盐碱土壤 CO₂ 累积吸收的有效措施, 对丰富碳循环理论与节能减排规划都具有特殊意义。

4 结论

(1) 土壤 EC 是调控土壤 CO₂ 吸收速率的重要因子, 各组土壤在培养期间均表现出吸收特征, EC 越高的土壤达到 CO₂ 吸收峰值的时间越快。

(2) EC 高的盐碱土壤, CO₂ 累积吸收量高 (R²=0.8637)。高 EC 增加土壤 CO₂ 累积吸收量。

后续会完善实验体系, 揭示多因子协同调控规律。此外, 可增加培养周期, 同步测定气体与土壤无机碳, 深入探究盐碱土壤碳汇效应。盐碱土壤环境多变且复杂, 为进一步探明盐碱土壤 CO₂ 吸收机理和土壤碳汇效应需要综合土壤微生物、环境地

球化学等领域, 为后续研究提供更多数据支撑。

参考文献

- 法科宇, 雷光春, 张宇清, 等. 2018. 荒漠地区大气—土壤的碳交换过程[J]. *地球科学进展*, 33(5): 464–472. [Fa K Y, Lei G C, Zhang Y Q, et al. 2018. Carbon exchange process between atmosphere and soil in desert soils [J]. *Advances in Earth Science*, 33(5): 464–472.]
- 李彦, 王玉刚, 唐立松. 2016. 重新被“激活”的土壤无机碳研究[J]. *土壤学报*, 53(4): 845–849. [Li Y, Wang Y G, Tang L S. 2016. The effort to re-activate the inorganic carbon in soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 53(4): 845–849.]
- 刘秉旺, 张茂盛, 陈龙生, 等. 2012. 内蒙古河套灌区土壤盐渍化成因研究[J]. *西部资源*, (3): 172–173. [Liu B W, Zhang M S, Chen L S, et al. 2012. Study on the cause of soil salinization in the Hetao irrigation area of Inner Mongolia [J]. *Western Resources*, (3): 172–173.]
- 刘沙滨, 阿荣其其格, 王琳. 2001. 内蒙古土地盐渍化典型区域动态监测研究[J]. *中国环境监测*, 17(4): 24–27. [Liu S B, Arongqiige, Wang L. 2001. Study on dynamically monitoring the land salinizing in the typical area of Inner Mongolia [J]. *Environmental Monitoring in China*, 17(4): 24–27.]
- 刘再华. 2001. 碳酸酐酶对碳酸岩溶解的催化作用及其在大气 CO₂ 沉降中的意义[J]. *地球学报*, 22(5): 477–480. [Liu Z H. 2001. The role of carbonic anhydrase as an activator in carbonate rock dissolution and its significance in atmospheric CO₂ precipitation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 22(5): 477–480.]
- 王境坤. 2015. 天津市西青区土壤含盐量与电导率关系分析[J]. *吉林水利*, (9): 28–32. [Wang J K. 2015. Analysis of the relationship between soil salinity and conductivity in Xiqing District of Tianjin [J]. *Jilin Water Resources*, (9): 28–32.]
- 王忠媛, 谢江波, 王玉刚, 等. 2013. 盐碱土土壤无机 CO₂ 通量与土壤盐碱属性的关系[J]. *生态学杂志*, 32(10): 2552–2558. [Wang Z Y, Xie J B, Wang Y G, et al. 2013. Soil inorganic CO₂ flux in relation to soil pH and electric conductivity in saline/alkaline soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(10): 2552–2558.]
- 温慧洋, 焦燕, 杨铭德, 等. 2016. 不同盐碱程度土壤氧化亚氮 (N₂O) 排放途径的研究[J]. *农业环境科学学报*, 35(10): 2026–2033. [Wen H Y, Jiao Y, Yang M D, et al. 2016. Studies on emission pathways of nitrous oxide from different salinization soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 35(10): 2026–2033.]
- 杨劲松. 2008. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 45(5): 837–845. [Yang J S. 2008. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(5): 837–845.]
- 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 等. 2019. 内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收规律[J]. *环境科学*, 40(4): 1950–1956. [Yang W Z, Jiao Y, Yang M D, et al. 2019. CH₄ uptake in different saline-alkaline soils in Hetao irrigation district, Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 40(4): 1950–1956.]
- 张晓华, 高云, 祁悦, 等. 2014. IPCC 第五次评估报告第一工作组主要结论对《联合国气候变化框架公约》进程的影响分析[J]. *气候变化研究进展*, 10(1): 14–19. [Zhang X H, Gao Y, Qi Y, et al. 2014. Implications of the findings from the working group I contribution to the IPCC fifth assessment report on the UNFCCC process [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 10(1): 14–19.]
- Carmi I, Kronfeld J, Moinester M. 2019. Sequestration of atmospheric carbon dioxide as inorganic carbon in the unsaturated zone under semi-arid forests [J]. *Catena*, 173: 93–98.
- Duiker S W, Lal R. 1999. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio [J]. *Soil and Tillage Research*, 52(1/2): 73–81.
- Li J G, Pu L J, Han M F, et al. 2014. Soil salinization research in China: advances and prospects [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(5): 943–960.
- Liu J B, Fa K Y, Zhang Y Q, et al. 2015. Abiotic CO₂ uptake from the atmosphere by semiarid desert soil and its partitioning into soil phases [J]. *Geophysical Research Letters*, 42(14): 5779–5785.
- Matter J M, Stute M, Snaebjornsdottir S O, et al. 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions [J]. *Science*, 352(6291): 1312–1314.
- McGrail B P, Schaef H T, Spane F A, et al. 2017. Field validation of supercritical CO₂ reactivity with basalts [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(1): 6–10.
- Stone R. 2008. ECOSYSTEMS: have desert researchers discovered a hidden loop in the carbon cycle? [J]. *Science*, 320(5882): 1409–1410.
- Xie J X, Li Y, Zhai C X, et al. 2009. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle [J]. *Environmental Geology*, 56(5): 953–961.