

# 新疆尾闾盐湖滨岸盐碱土中碳酸盐的固碳效应及影响因素

张 芳<sup>1,3</sup>, 熊黑钢<sup>2,3\*</sup>, 张兆永<sup>1,3</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083;  
3. 教育部新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:** 土壤碳酸盐对现代大气 CO<sub>2</sub> 的截存与土壤中的硅酸盐矿物组成、盐基元素供给、有机碳含量等因子密切相关。该文结合土壤理化性质和碳同位素分馏特性, 以新疆艾比湖为例, 探讨了干旱区尾闾盐湖滨岸盐碱土中碳酸盐的固碳效应和影响因素, 研究结果表明: 1) 土壤碳酸盐是干旱区最重要的碳库, 艾比湖滨岸土壤碳酸盐的平均碳密度是有机碳的 4.05 倍; 2) 艾比湖滨岸盐碱土中的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  介于 -7.9‰~0.3‰ 之间,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  与  $\text{HCO}_3^-$  存在良好的线性负相关关系, 决定系数高达 0.669 9, 大气碳以重碳酸盐形式存在是次生碳酸盐淀积的关键环节之一; 3) 土壤  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值与硅酸盐矿物阳起石、绿泥石、伊利石存在着良好的线性负相关关系,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值随着富 Ca、Mg、Fe 矿物的含量增加明显向负向漂移; 4) 土壤中有机碳含量越高, 生物风化过程越强烈时,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  负向漂移越大, 土壤碳酸盐截存较多大气中的轻碳; 当土壤含盐量超过一定程度时, 有机过程受到抑制, 土壤碳酸盐则截存较多大气中的重碳。因此, 干旱区存在着有机-无机耦合固碳效应, 提高干旱区植被覆盖, 可以增加有机碳库储量, 同时, 经有机过程分馏转移到土壤中的 CO<sub>2</sub> 可进一步促进土壤硅酸盐矿物风化, 使这部分 CO<sub>2</sub> 不再返回大气, 而是以碳酸盐形式被长久固存。

**关键词:** 土壤; 生态; 碳; 干旱区尾闾盐湖; 成土碳酸盐; 碳稳定同位素; 分馏固碳效应

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.016

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0122-06

张 芳, 熊黑钢, 张兆永. 新疆尾闾盐湖滨岸盐碱土中碳酸盐的固碳效应及影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 122—127. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.016 http://www.tcsae.org

Zhang Fang, Xiong Heigang, Zhang Zhaoyong. Carbon sequestration effect and influential factors in pedogenic carbonates of saline-alkaline soils from shore of rump salt lake in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 122—127. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.016 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

CO<sub>2</sub> 是最主要的温室气体之一, 观测记录表明, 仅近 160 多年来, CO<sub>2</sub> 在大气中的浓度就从  $280 \times 10^{-6}$  增加到了  $400 \times 10^{-6}$  [1-2]。陆地生态系统中, 土壤碳库容量大、周转慢, 是全球碳循环中的关键环节之一, 其微小变化将会对大气 CO<sub>2</sub> 浓度产生明显影响 [3]。中国处于干旱和半干旱气候地区的国土面积广大, 土壤碳酸盐是干旱/半干旱地区土壤碳库的主要存在形式, 较有机碳库大 2~5 倍 [4], 但是目前对土壤碳酸盐在地球表层系统碳截存中的作用还知之甚少 [5-6]。因此对以低更新速率碳形态存在的土壤碳酸盐固碳效应进行研究, 具有重要的科学价值 [7]。

自然界中的碳主要集中在有机碳和无机碳 2 大碳库中, 二者的碳同位素组成相差悬殊 [8], 碳同位素技术对于各碳库中碳元素的迁移有较好的指示作用 [9-11]。 $\delta^{13}\text{C}$  (‰) 用于表示样品中 <sup>13</sup>C 和 <sup>12</sup>C 这 2 种碳稳定同位素的丰度关系, 当  $\delta$  为正值时, 表明样品富重同位素 <sup>13</sup>C, 负值时则富轻同位素 <sup>12</sup>C。土壤碳酸盐同时存在于地质大循环和生

物小循环过程之中, 受物理、化学、生物风化的共同作用, 载有成土过程中的风化信息, 其碳同位素可以反映土壤 CO<sub>2</sub> 的同位素组成及成土碳酸盐对现代大气 CO<sub>2</sub> 的截存效应, 与原生碳酸盐并没有明显的继承关系 [12]。艾比湖位于新疆准噶尔盆地最低处, 系干旱区内陆尾闾盐湖, 在现代盐湖沉积中具有代表性。本研究以艾比湖滨岸典型盐碱土为研究对象, 结合稳定碳同位素分馏特性和土壤理化性质, 探讨土壤碳酸盐的固碳效应和影响因素, 以期干旱区土壤碳循环研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

新疆北部准噶尔盆地系晚古生代-中生代挤压叠合盆地, 是中国大型含油气盆地之一, 经历了海西、印支、燕山和喜山多期构造演化, 沉积岩最大厚度达 14 000 m [13]。样地位于准噶尔盆地西端低处集水区艾比湖滨岸 (图 1)。艾比湖北、西、南三面环山, 系断裂构造带陷落湖, 2 万 5 千年前 (第四纪晚更新世), 艾比湖水域面积达 3 600 km<sup>2</sup>, 水深 40 m, 水质良好, 之后随着气候转暖, 湖面不断萎缩, 矿化度升高, 现艾比湖湖面仅剩 500 余 km<sup>2</sup>, 已变成平均水深约 1.4 m、最大水深不足 3 m、湖水 pH 值 8.4~8.9 的硫酸钠型盐湖 [14]。艾比湖区域气候干燥, 年均降水约 90.9 mm, 年蒸发量达 3 790 mm 以上, 年均温 8.3 ℃, 受西北部阿拉山口影响, 全年风

收稿日期: 2018-08-10 修订日期: 2018-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (41761041, 41261049, 41671198)

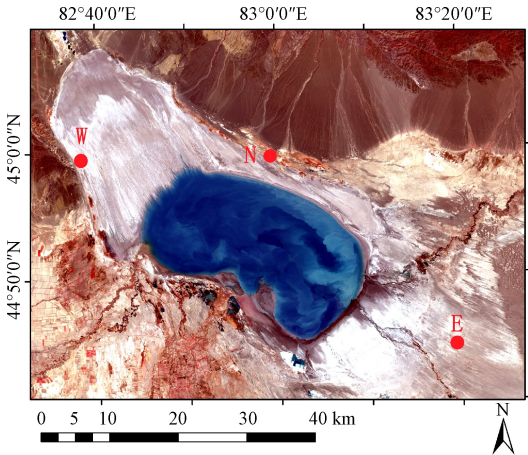
作者简介: 张 芳, 副教授, 博士, 主要从事干旱区环境演变研究。

Email: zhangf602@163.com

\*通信作者: 熊黑钢, 教授, 博导, 主要从事干旱区人地关系研究。

Email: xhg1956@sohu.com

力 8 级以上时间长达 165 d，最大风速达 55 m/s<sup>[15]</sup>。在陆源碎屑沉积（包括河道沉积、片流沉积、湖积、风积等）和蒸发过程中化学沉积的共同作用下，艾比湖滨岸形成了复杂陆面过程下的强盐碱化土壤环境。



注：E、N、W 为 3 个典型样地。  
Note: E, N and W are 3 typical sample plots.

图 1 艾比湖采样区示意图  
Fig.1 Study region and sampling sites in Abi Lake

1.2 研究方法

1.2.1 样本采集

采样时间为旱季末（2014 年 10 月）。避开农业区和入湖水系，分别在艾比湖北部、西部和东部设置 N、W、E 3 个样地（图 1），选择地表特征均质，地形平坦，面积超过 100 m×100 m 的区域设置样地，样地周围土壤环境因子相似，异质性较小。每个样地在中心设置采样点，然后按十字星状向外辐射约 30 m 处各设置一个采样点，共挖取 5 个土壤剖面，各剖面分别采集 6 个土层（0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm、80~100cm）的土壤样本。采样同时，也采用环刀法采集原状土样，用于土壤容重测定。

1.2.2 土壤理化性质检测分析

土壤样本在实验室自然晾干、过 2 mm 筛。等量地将每个样地 5 个剖面上对应土层样本进行充分混合，采用四分法装入采样袋作为该样地检测样本，最终得到艾比湖 3 个不同方位和不同剖面深度的土壤样本 18 个。主要检测指标和检测方法如下：

1) 土壤理化性质指标测定<sup>[16]</sup>：包括土壤 pH 值、含盐量、八大离子、土壤有机碳（soil organic carbon, SOC）、土壤碳酸盐（soil carbonate carbon, SCC）。其中，Cl<sup>-</sup>

采用硝酸银滴定法测定，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>采用双指示剂-中和滴定法测定，Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>均采用 EDTA 滴定法测定，K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>采用原子吸收分光光度法测定，水溶性总盐（total salt, TS）采用烘干残渣法测定，SOC 采用外加热重铬酸钾容量法测定，SCC 采用气量法测定，土壤水溶性无机碳（soil dissolved inorganic carbon, SDIC）为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>之和。根据公式<sup>[17-18]</sup>分别计算 SCC、SOC、SDIC 这 3 种碳库组分的碳密度（1 m 深度土体中的碳质量/(kg/m<sup>2</sup>))：SCCD、SOCD 和 SDICD。

2) 土壤样本的矿物组成采用 XRD 衍射方法测定，检测过程由新疆矿产实验研究所完成，检测仪器为 Bruker D8 Advance Diffractometer（德国）。X 射线采用 CuKα 辐射（λ=1.540 60 Å），扫描范围为 2.5°~52°（2θ），扫描步长为 0.01°（2θ）。

3) 土壤碳酸盐的稳定碳同位素 δ<sup>13</sup>C<sub>SCC</sub> 分析，样品由中科院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室进行测试，使用质谱型号为 MAT-253，所报数据为相对国际标准 VPDB 之值，标准偏差优于 0.15‰。

本文数据分析在统计软件 SPSS 15.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤理化特征及碳库构成

表 1 为 E、N、W 3 个样地 1 m 深度土壤的主要理化性质和不同碳库固碳量。长石族（Feldspar）是地壳表层含量最高的富含碱金属或碱土金属的铝硅酸盐矿物。表 1 中，E 区的斜长石（Plagioclase）含量为 41.23%，N 和 W 样区也分别含有 22.27%和 24.37%的斜长石，其含量差异与不同样区土壤的风化程度或者沉积物搬运来源及搬运方式有关。3 个样地土壤 pH 值在 8.5 左右，碱化程度相近，属于中度碱化。水溶性总盐（TS）含量以湖西样地 W 最高，为 65.58 g/kg，W 在 3 个样地中海拔最低，作为干涸湖底裸露于地表的时间最短，偶有丰水期时，仍会受浸水影响，因此其受盐湖沉积作用也最强烈；东部样地 E 的总盐含量也很高，为 55.77 g/kg，这是因为 E 区位于阿拉山口的下风口，极高的表土含盐量主要来自常年大风对盐尘的输送和沉降；北部样地 N 的含盐量最小，说明其受盐湖影响较小。Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>是成土碳酸盐的主要阳离子，Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>以 W 区的含量最高，其次是 E 区，说明水难溶的碳酸盐类如 CaCO<sub>3</sub> 沉淀后，W 和 E 区土体中依然剩余较多游离的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>通过蒸发作用在土体上部形成硫酸盐和氯化物盐。

表 1 土壤主要理化性质和碳库构成  
Table 1 Main physical and chemical properties and different carbon pool components for soil samples

样地 Plots	pH 值 pH value	斜长石 Plagioclase/%	物质含量 Substances content									无机碳与有机碳比值 SIC/SOC
			水溶性总盐 Total salt TS/ (g·kg <sup>-1</sup> )	Cl/ (g·kg <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-/ (g·kg<sup>-1</sup>)</sup>	Ca <sup>2+/ (g·kg<sup>-1</sup>)</sup>	Mg <sup>2+/ (g·kg<sup>-1</sup>)</sup>	Na <sup>+/</sup> (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤碳酸盐碳 密度	土壤有机碳 碳密度	土壤水溶性无机碳 碳密度	
									Soil carbonate carbon density SCCD/ (kg·m <sup>-2</sup> )	Soil organic carbon density SOCD/ (kg·m <sup>-2</sup> )	Soil dissolved inorganic carbon density DICD/ (kg·m <sup>-2</sup> )	
E	8.51	41.23	55.77	9.61	24.04	1.58	1.04	13.97	10.79	2.62	0.05	4.13
N	8.47	22.27	7.70	3.34	0.91	0.20	0.13	2.21	25.58	5.89	0.08	4.36
W	8.57	24.37	65.58	25.80	12.46	3.18	1.29	16.42	22.45	6.13	0.04	3.67

N 区位于冲积扇边缘平缓带, 植被盖度超过 50%, 草本、灌木/半灌木及胡杨均生长旺盛, 因此, N 区的有机碳密度较高, 为  $5.89 \text{ kg/m}^3$ ; 高含盐的 W 区几乎无植被覆盖, 但有机碳密度最高, 达  $6.13 \text{ kg/m}^3$ , 这些有机碳可能源自原湖水中的生物沉积。E 区也有较高易溶盐含量, 但由于脱离淹水环境早, 原来积累的有机物质在氧化环境中逐渐矿化, 有机碳密度很低。N 区碳酸盐碳固碳量在 3 个样地中最高, 为  $25.58 \text{ kg/m}^3$ , 其次是 W 区, 为  $22.45 \text{ kg/m}^3$ , E 区最低, 也有  $10.79 \text{ kg/m}^3$  的固碳量, 因此, 3 个样地的土壤碳库均以碳酸盐碳为主, 其固碳量分别是有机碳的 4.36、4.13 和 3.67 倍, 平均达 4.05 倍。

## 2.2 土壤不同碳库的剖面分布特征

图 2 为各样地 SOC、SCC、SDIC 及碳酸盐稳定碳同位素的剖面分布特征。土壤碳酸盐 (SCC) 在土表层含量最少, 向下逐渐富集 (图 2a)。其中, E 区的最大富集深度为 40~80 cm, N 区的最大富集深度为 40~60 cm, W 区的最大富集深度则在 80 cm 以下。N 区和 W 区有机碳 (SOC) 的剖面分布趋势相反 (图 2b), N 区 SOC 表聚强烈, 这也进一步说明了 N 区的有机碳主要来自植被凋落物的输入, 受现代生物风化过程影响明显, 而 W 区土壤有机碳源自历史时期的湖中生物沉积, 有机质在剖面上分布相对均匀, 当湖面萎缩至 W 区脱离淹水环境, 表层有机质由于矿化速率增强而逐渐减少。E 区由于表土高含盐量, 植物难以生存, 源自湖中生物沉积的有机物质也大部被矿化, 因此整个剖面上的 SOC 含量很少 (不足 0.3%), 分布也较均匀。水溶性无机碳 (SDIC) 主要由  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  构成, 它们影响着碳酸盐的溶解和再结晶过程。图 2c 中 E 和 W 样区的 SDIC 含量较接近, 在 0.1~0.3 g/kg 之间, N 区土体中部含量较高, 可达 0.45 g/kg 左右, 这可能与有机过程有关, 植物根系呼吸、有机物分解、微生物活动等都会增加土体中  $\text{CO}_2$  浓度, 与土壤水化合形成碳酸。

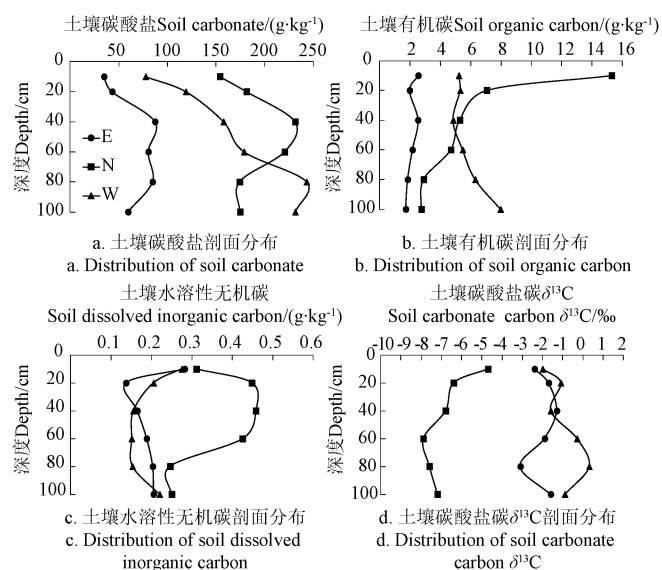


图 2 不同赋存形式土壤碳组分及  $\delta^{13}\text{C}$  的剖面分布特征

Fig.2 Soil profile distribution of different types soil carbon and  $\delta^{13}\text{C}$

土壤中  $\text{CO}_2$  来源包括大气二氧化碳渗入、植物根系呼吸释放、有机残体氧化分解等, 其  $\text{CO}_2$  分压远高于大气层。土壤碳酸盐的碳同位素组分会受到植被的碳同位素组分影响, 因为光合作用使生物体有机碳富集  $^{12}\text{C}$ , 这是陆地生态系统中碳同位素分馏的主要环节, 因此, 自然界中有机碳库和无机碳库的碳同位素组成差别较大, 前者轻, 后者重。从图 2d 来看, E 和 W 区土壤的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  较大, 其中 E 区在  $-3.1\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$  之间, W 区在  $-2\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$  之间。在剖面 80 cm 深处, E 和 W 的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  出现了一个明显的反向波动, 原因可能是当时的沉积环境出现了明显变化, 例如湖水面积、入湖水系、温度、沉积速率等。N 区土壤的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  最小 ( $-7.9\text{‰} \sim -4.7\text{‰}$ ), 与 E 和 W 区相比, 明显偏负, 结合各样区实地植被环境和土壤碳酸盐碳与有机碳赋存情况来看, N 区受现代生物活动影响较大, 可能存在着较强的  $\text{CO}_2$  从有机碳库向无机碳库转移的效应, 而 E 和 W 样区则以碳酸盐的无机化学沉积过程为主。

## 2.3 影响土壤碳酸盐稳定碳同位素的主要因素

基于 3 个样区 18 个样本的相关检测数据和统计学方法, 图 3 阐述了影响艾比湖湖滨岸盐碱土中碳酸盐稳定碳同位素组成的主要因素。研究区土壤的主要矿物构成除长石 (Feldspar) 外, 还包括石英 (Quartz)、绿泥石 (Clinocllore)、伊利石 (Illite)、方解石 (Calcite)、阳起石 (Actinolite) 等。各样地中土壤  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值与链状硅酸盐矿物阳起石  $[\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2]$  存在十分显著的线性负相关关系, 决定系数  $R^2$  达 0.7722。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值与黏土矿物绿泥石  $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6[(\text{OH})_8(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}]$  也存在着良好的线性负相关关系,  $R^2$  为 0.6139。伊利石晶体结构式可写成  $\text{K}_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_4(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 是由长石、云母等铝硅酸盐矿物风化脱  $\text{K}^+$  形成的黏土矿物。由于伊利石与其他黏土矿物相比较稳定, 同晶代换能力相对较弱,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  与伊利石的线性负相关关系略弱,  $R^2$  为 0.4274。综合图 3a~图 3c 可知,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值随着富 Ca、Mg、Fe 硅酸盐矿物含量的增加而负向漂移, 说明在风化成壤过程中, 土壤次生碳酸盐形成并对现代大气中的  $\text{CO}_2$  起到了截存作用。

图 2a 和图 2b 可以看出, 除 N 区表层样本外, 其他土壤样本基本呈现出 SOC 含量越高, SCC 含量也越高的特征, 但  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  与 SCC 和 SOC 含量没有显著的相关性, 而是与 SDIC 存在较好的线性负相关关系, 与  $\text{HCO}_3^-$  含量的  $R^2$  可达 0.6699 (图 3d),  $\text{HCO}_3^-$  含量越高,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值越低, 这说明: ①大气碳以重碳酸盐形式存在是次生碳酸盐淀积和碳截存的关键环节之一; ②经过生物过程分馏后, 由土壤中有机质分解, 根系呼吸等转移的大气  $\text{CO}_2$  形成的重碳酸盐富  $^{12}\text{C}$ , 有机过程影响越强烈,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  的负向漂移越大。

水溶性盐 (TS)、水溶性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量与碳酸盐含量关系不明显, 但是与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值的对数关系较显著 ( $R^2$  分别高达 0.7587 和 0.6947) 且趋势一致 (图 3e~图 3f), 这说明含盐量超过一定程度时, 有机过程受到抑制, 二

氧化碳向重碳酸盐-碳酸盐转移中主要以无机过程为主, 盐度越高, 淀积的碳酸盐越富集  $^{13}\text{C}$ , 含盐量大于  $20\text{ g/kg}$  时, 样本的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值基本上也大于  $-2$ 。

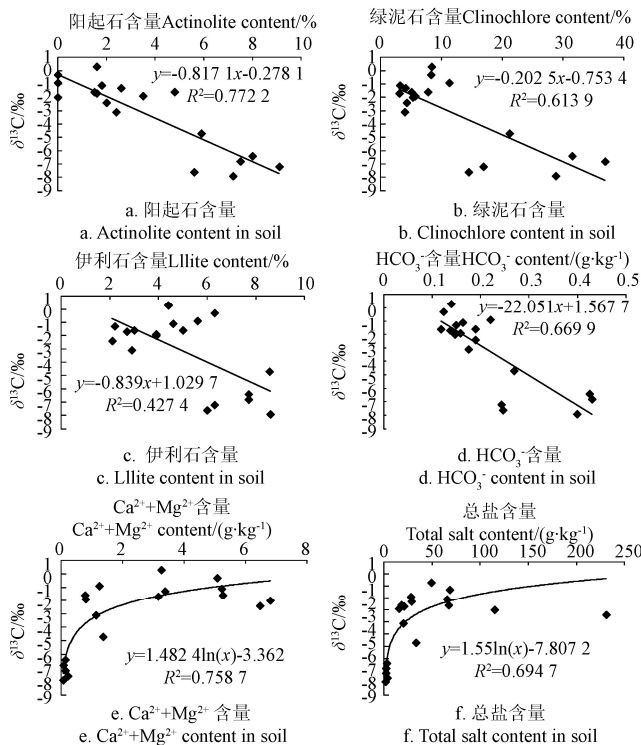


图3 影响土壤碳酸盐碳  $\delta^{13}\text{C}$  的主要因素

Fig.3 Main influential factors in soil carbonate carbon  $\delta^{13}\text{C}$

### 3 讨论

#### 3.1 土壤碳酸盐的固碳效应

有学者认为, 碳酸盐在土壤中通过溶解-再沉积过程对  $\text{CO}_2$  产生的影响仅是库与库之间的简单迁移<sup>[19-21]</sup>, 这一观点主要基于气候变化的岩石风化控制学说, 该学说认为是硅酸盐的化学风化碳汇作用 ( $\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ ) 控制着长时间尺度的气候变化, 而碳酸盐的化学风化作用 ( $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ ) 不具有这一功能, 认为碳酸盐溶解过程中消耗的  $\text{CO}_2$  又通过相对快速的碳酸盐沉积而返回大气。另有学者的最新研究表明, 在干旱区内陆盆地的风化、搬运、沉积过程中, 有大量的非碳酸盐岩来源的钙离子向盆地低处汇聚,  $\text{CO}_2$  的净截存因此产生: 硅酸盐风化过程中利用的  $\text{CO}_2$  来自大气,  $2\text{ mol}$  的  $\text{CO}_2$  产生  $2\text{ mol}$  的  $\text{HCO}_3^-$  并释放  $1\text{ mol}$  的  $\text{Ca}^{2+}$ , 这  $1\text{ mol}$  的  $\text{Ca}^{2+}$  形成次生碳酸盐沉淀时, 只向大气中返回了  $1\text{ mol}$  的  $\text{CO}_2$ , 另  $1\text{ mol}$  的  $\text{CO}_2$  被净截存 ( $2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ )<sup>[22]</sup>。

本研究对土壤矿物的分析结果显示, 3个样地土壤中都赋存着大量的斜长石、阳起石、绿泥石、伊利石等硅酸盐矿物风化沉积物 (表1, 图3)。长石族矿物较石英容易风化, 富含 K、Na、Ca、Mg、Ba 等, 约占地壳总质量的  $50\%$ <sup>[23-24]</sup>。阳起石富含 Ca、Mg、Fe 等, 不稳定、易风化, 易于变成绿泥石、滑石、碳酸盐等<sup>[14]</sup>。绿泥石富含 Mg、Fe, 形成环境为碱性, 易风化, 通常存在于在

化学风化作用受抑制的冰川或干旱地区<sup>[25-26]</sup>。综上所述可知, 干旱区成土过程中, 土体内存在长期稳定的源自硅酸盐矿物风化的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  等阳离子供给。特别是土壤盐碱化区域, 来自于盆地周边高地的非原生碳酸盐源的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  等通过水、风等营力持续不断地向低洼集水区输入, 为土壤碳酸盐截存现代大气  $\text{CO}_2$  提供的充分的物质基础。因此, 土壤碳酸盐作为干旱区最重要的碳库, 固碳潜力大且长期稳定, 对大气  $\text{CO}_2$  降低有重要意义。

#### 3.2 有机过程对土壤碳酸盐固碳效应的影响

自然界中有机碳库富集轻碳, 而无机碳库富集重碳。源自海相碳酸盐的  $\delta^{13}\text{C}$  值常在  $0 \sim 3\text{‰}$  范围内变化, 与大气水有关的碳酸盐  $\delta^{13}\text{C}$  在  $-1\text{‰} \sim -5\text{‰}$  范围内变化, 有机碳的  $\delta^{13}\text{C}$  一般为  $-25\text{‰}$ , 大气  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  平均约为  $8\text{‰}$ <sup>[8,13,27]</sup>。土壤中生物作用越强烈, 土体中  $\text{CO}_2$  浓度越高, 土壤溶液中的  $\text{HCO}_3^-$  含量也越高。本研究中,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  与土壤溶液中  $\text{HCO}_3^-$  含量间的负相关  $R^2$  可达  $0.6699$  (图3d), 这与纯无机过程明显不同, 因为在纯无机过程中, 当  $\text{CO}_{2(\text{g})} - \text{HCO}_{3(\text{aq})}^-$  系统达到碳同位素平衡时, 重碳酸盐离子比气态  $\text{CO}_2$  平均富集  $5\text{‰}$  的  $^{13}\text{C}$ <sup>[28]</sup>。这说明土壤中经过有机过程转移的大气  $\text{CO}_2$  形成的重碳酸盐富  $^{12}\text{C}$ , 重结晶后的次生碳酸盐  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  产生了负向漂移。因此, 干旱区存在着有机-无机碳库耦合固碳效应, 提高干旱区植被覆盖, 既可以增加有机碳库储量, 也可以增加无机碳库储量, 因为经有机过程分馏转移到土壤中的  $\text{CO}_2$  可以加速土壤硅酸盐矿物风化, 使一部分  $\text{CO}_2$  不再返回大气, 而是以碳酸盐形式被长久固存。

### 4 结论

1) 土壤碳酸盐富集区是内陆干旱盆地地表生环境下硅酸盐化学风化过程中形成碳汇的重要场所, 碳酸盐碳库是干旱区最重要的碳库, 对大气二氧化碳降低具有重要意义。艾比湖滨岸土壤碳库均以碳酸盐碳为主, 碳酸盐碳密度高达  $25.58\text{ kg/m}^3$ , 碳酸盐碳库固碳量是有机碳库的  $3.67 \sim 4.36$  倍。

2) 艾比湖滨岸盐碱土中的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  介于  $-7.9\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$  之间, 湖北部土壤的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  最轻, 西部最重。土壤  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  与  $\text{HCO}_3^-$  含量存在良好的线性负相关关系,  $R^2$  高达  $0.6699$ , 大气碳以重碳酸盐形式存在是次生碳酸盐淀积的关键环节之一。

3)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值与富含 Ca、Mg、Fe 等的土壤硅酸盐矿物阳起石、绿泥石、伊利石存在着良好的线性负相关关系, 与阳起石的  $R^2$  可达  $0.7722$ 。  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  值随着富 Ca、Mg、Fe 矿物的含量增加明显向负向漂移。

4) 干旱区土壤碳酸盐的碳截存与风化成土形式密切相关, 当土壤有机碳含量越高, 生物风化过程越强烈时,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  负向漂移越大, 土壤碳酸盐将截存较多的经过有机质分解、根系呼吸等分馏的大气中的轻碳; 当土壤含盐量超过一定程度时, 有机过程受到抑制,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  增大, 成土碳酸盐则截存较多大气中的重碳。

## [参 考 文 献]

- [1] Le Q C, Moriarty R, Andrew R M, et al. Global carbon budget[J]. *Earth system science data discuss*, 2014(7): 521—610.
- [2] 冯雪, 王森, 牛振川. 北京市和厦门市大气 CO<sub>2</sub> 浓度及 δ<sup>13</sup>C 值变化特征[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(4): 316—322.  
Feng Xue, Wang Sen, Niu Zhenchuan. Variational characteristics of CO<sub>2</sub> concentrations and δ<sup>13</sup>C values at the urban sites in Beijing and Xiamen, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(4): 316—322. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐汝民, 李忠佩, 车玉萍, 等. 土地利用方式转变后灰色森林土有机碳矿化的温度响应特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1020—1025.  
Xu Rumin, Li Zhongpei, Che Yuping, et al. Temperature sensitivity of organic C mineralization in gray forest soils after land use conversion[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1020—1025. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张林, 孙向阳, 高程达, 等. 荒漠草原土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存 CO<sub>2</sub> 的研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(3): 578—586.  
Zhang Lin, Sun Xiangyang, Gao Chengda, et al. CO<sub>2</sub> sequestration in formation and turnover of pedogenic carbonates in soil of desert steppe, Inner Mongolia, China[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 578—586. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张豪, 汤洁, 梁爽. 吉林西部不同开发年份盐碱水田土壤有机碳和碳酸盐的季节动态[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(12): 1899—1903.  
Zhang Hao, Tang Jie, Liang Shuang. Seasonal variation of soil organic carbon and carbonate in saline-sodic paddy soils at different development years in western Jilin Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(12): 1899—1903. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王娜, 许文强, 徐华君, 等. 准噶尔盆地南缘荒漠区土壤碳分布及其稳定同位素变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2215—2221.  
Wang Na, Xu Wenqiang, Xu Huajun, et al. Spatial variation of soil carbon and stable isotopes in the southern margin desert of Junggar Basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2215—2221. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. *科学通报*, 2011, 56(26): 2162—2173.  
Zheng Jufeng, Cheng Kun, Pan Genxing, et al. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(26): 2162—2173. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张衍, 朱祥坤. 蓟县下马岭组菱铁矿的成因及古海洋意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1430—1438.  
Zhang Kan, Zhu Xiangkun. Genesis of siderites in the Xiamaling Formation of Jixian section and its paleoceanic significance[J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2013, 87(9): 1430—1438. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李杨梅, 贡璐, 安申群, 等. 基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3867—3875.  
Li Yangmei, Gong Lu, An Shenqun, et al. Transfer of soil organic carbon to inorganic carbon in arid oasis based on stable carbon isotope technique[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3867—3875. (in Chinese with English abstract)
- [10] Andreeva D B, Zech M, Glaser B, et al. Stable isotope (δ<sup>13</sup>C, δ<sup>15</sup>N, δ<sup>18</sup>O) record of soils in Buryatia, southern Siberia: Implications for biogeochemical and paleoclimatic interpretations[J]. *Quaternary International*, 2013(290/291): 82—94.
- [11] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 基于稳定同位素技术的土壤碳循环研究进展[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 980—987.  
Xu Wenqiang, Chen Xi, Luo Geping, et al. Progress of research on soil carbon cycle using carbon isotope approach[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 980—987. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡泉旭, 王先彦, 孟先强, 等. 青藏高原东北部黄土次生碳酸盐氧同位素的古气候意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(11): 4128—4137.  
Hu Quanxu, Wang Xianyan, Meng Xianqiang, et al. Paleoclimatic implications of oxygen isotope from authigenic carbonates in loess deposit of Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4128—4137. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杨智, 邹才能, 何生, 等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近碳酸盐胶结带的成因机理[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(4): 439—451.  
Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, et al. Formation mechanism of carbonate cemented zones adjacent to the top overpressured surface in the central Junggar Basin, NW China[J]. *Sci China Earth Sci*, 2010, 40(4): 439—451. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张芳, 张伟杰, 丁彦彦, 等. 艾比湖滨岸盐碱土中碳酸盐的 XRD 衍射特征与微观形态分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3893—3899.  
Zhang Fang, Zhang Weijie, Ding Yanyan, et al. XRD diffraction characteristics and microscopic morphology of carbonates in saline-alkaline soil from the shore of the Aibi Lake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3893—3899. (in Chinese with English abstract)
- [15] 谭娇, 丁建丽, 董煜, 等. 新疆艾比湖绿洲潜在蒸散量年代际变化特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 143—148.  
Tan Jiao, Ding Jianli, Dong Yu, et al. Decadal variation of potential evapotranspiration in Ebinur Lake oasis of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(5): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 徐敏云, 李培广, 谢帆, 等. 土地利用和管理方式对农牧交错带土壤碳密度的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 320—325.  
Xu Minyun, Li Peiguang, Xie Fan, et al. Response of soil organic carbon density to land-use types and management practices change in agro-pastoral zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(7): 320—325. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875—2882.  
Yang Jinyan, Wang Chuankuan. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2875—2882. (in Chinese with English abstract)
- [19] Sombroek W G, Nacht Ergaele F O, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils[J]. *AM-BIO*, 1993, 22: 417—425.
- [20] Capo R C, Chadwick O A. Sources of strontium and calcium in desert soil and calcrete[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 170: 61—72.
- [21] Dart R C, Barovich K M, Chittleborough D J, et al. Calcium in regolith carbonates of central and southern Australia: Its source and implications for the global carbon cycle[J]. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 249: 322—334.



- [22] Carmi I, Kronfeld J, Moinester M. Sequestration of atmospheric carbon dioxide as inorganic carbon in the unsaturated zone under semi-arid forests[Z]. 2017, arXiv preprint ar Xiv: 1702.05249v2.
- [23] 徐丹虹. 内蒙-广东土壤断面中土壤地球化学及矿物学特征对比: 以酸性岩成土母质为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. Xu Danhong. The Comparison of Soil Geochemical and Mineralogical Features in the Soil Transect from Inner Mongolia to Guangdong: As Exemplified by the Acidic Parent Material[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [24] Raja P, Bhaskar B P, Surendran U, et al. Pedogenesis of spatially associated red and black soils in Purna valley from semi-arid region of Central India[J]. Chemical Geology, 2018, 483: 174–190.
- [25] 方谦, 洪汉烈, 赵璐璐, 等. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. 地球科学, 2018, 43(3): 753–769. Fang Qian, Hong Hanlie, Zhao Lulu, et al. Climatic implication of authigenic minerals formed during pedogenic weathering processes[J]. Earth Science, 2018, 43(3): 753–769. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨志杰, 王福刚, 杨冰, 等. 砂岩中绿泥石含量对矿物封存影响的模拟研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(2): 201–207. Yang Zhijie, Wang Fugang, Yang Bing, et al. Numerical simulation of the influence of chlorite on the content of mineral trapping of CO<sub>2</sub> in the sandstone[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2014, 33(2): 201–207. (in Chinese with English abstract)
- [27] 毕哲, 周泽义, 刘紫譔, 等. 二氧化碳同位素标准物质研究进展[J]. 化学分析计量, 2018, 27(5): 122–126. Bi Zhe, Zhou Zeyi, Liu Zixuan, et al. Development on isotope reference material of carbon dioxide[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2018, 27(5): 122–126. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈锦石. 碳同位素地质学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1983.

## Carbon sequestration effect and influential factors in pedogenic carbonates of saline-alkaline soils from shore of rump salt lake in Xinjiang

Zhang Fang<sup>1,3</sup>, Xiong Heigang<sup>2,3\*</sup>, Zhang Zhaoyong<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. College of Art and Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology (Xinjiang University) Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** China has a large area of arid and semi-arid zone. The soil carbonate is the main form of soil carbon pool in arid and semi-arid regions, which has an important scientific research value. Soil carbonate contains weathering information during soil formation, and the capacity of carbon sequestration of pedogenic carbonates is closely related to the base cations supplying, silicate minerals comprising and organic matters in the soils. In this study, to keep away the agricultural areas and the entering water system, we set 3 different typical sample plots (N、W、E) in the north, west, and east shore of the rump salt Lake Abi. Respecting to the physical and chemical properties of soil and the characteristics of carbon isotopic fractionation of pedogenic carbonates, the carbon sequestration effect and influential factors in pedogenic carbonates of saline-alkaline soils from the shore of the Abi Lake had been investigated. The research results showed that there was a long-term and stable supply of Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> and other cations derived from the weathering of silicate minerals during the process of saline-alkaline soils' formation in this study region. These cations of non-lithogenic carbonate sources came from the highlands around the lake basin carried into the low-lying catchment area in continuously by the water, wind and other forces etc., providing sufficient materials for soil carbonate to sequester modern atmospheric CO<sub>2</sub>. The average carbon density of soil carbonate carbon(SCC) was 4.05 times as many as that in soil organic carbon(SOC) in the saline-alkaline soils from shore of the Abi Lake. The results of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  had indicated that the value ranged from -7.9‰ to 0.3‰, and there was a very significant negative correlation between  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and the correlation value ( $R^2$ ) is 0.6699. One of the critical segment of secondary carbonate precipitation was that atmospheric carbon dioxide was dissolved into soil water in the form of bicarbonate ion. However, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  was also very significantly negatively correlated with the soil silicate minerals (actinolite, clinocllore and Illite). And with the increase of those Ca, Mg and Fe rich minerals in the soil,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  decreased. Similarly, with more SOC content and higher biological weathering intensity in the soil, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  increased to bigger negative values. And in these cases, the pedogenic carbonate would sequester more light carbon from atmosphere. Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> contents of water-soluble salts and total salt with soil carbonate contents correlation value were not too high, but they were significantly correlated with the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  in a concordant logarithmic relationship. The value was 0.7587 and 0.6947 respectively. If the biological weathering process was restrained by extremely higher soil salinity, the results implied that the pedogenic carbonate would sequester more heavy carbon. In this research, the transfer of carbon dioxide to bicarbonate-carbonate was mainly an inorganic process, when the salt content was more than 20 g/kg, and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SCC}}$  basically value was greater than -2. However, there was a coupling effect between organic process and inorganic process in carbon sequestrating. If the vegetation coverage was considered, the SOC pool could be increased. And in this way, the silicate weathering in soil could be strengthened by high concentration CO<sub>2</sub> that was fractionated from biological process, and instead of returning to atmosphere. Hence, the pedogenic carbonate in arid areas has great potential capacity for atmospheric CO<sub>2</sub> sequestration.

**Keywords:** soils; ecology; carbon; rump salt lake in arid region; pedogenic carbonate; stable carbon isotope; coupling effect of carbon fractionating sequestration