网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.017

基于稳定同位素技术的土壤有机碳转化特征研究

姚佳[1a,2],王雪韧[1a,2],于群家[1b],刘长涛[3],赵世翔[1a,2]

(1 内蒙古农业大学 a 资源与环境学院 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室,b 草原资源教育部重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;2 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;3 内蒙古草业技术创新有限公司,内蒙古 呼和浩特 010010)

[摘 要] 【目的】分析农田土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)及无机碳(soil inorganic carbon,SIC)的分布特征,定量计算 SOC 向无机碳酸盐的转化量,旨在为农田土壤改良、探明碳循环过程提供参考。【方法】于 2023 年玉米生长季前(5 月 8 日)和生长季后(10 月 12 日),在内蒙古自治区内蒙古农业大学科技园区内采集不同土层土样以及土壤 CO_2 气体,结合碳稳定同位素技术测定 SOC、SIC 含量及其稳定同位素值($\delta^{13}C$),在此基础上计算土壤次生碳酸盐(pedogenic carbonate,PIC)形成过程中 CO_2 来源及质量,探究固碳过程中 SOC 向无机碳酸盐转化量。【结果】在作物生长季,0~100 cm 土层 SOC 含量为 6.01~13.38 g/kg,随土层深度增加总体降低;0~100 cm 土层土 SIC 含量为 9.95~30.32 g/kg,随土层深度的增加呈先下降后上升再下降的变化趋势;0~100 cm 土层 SOC 和 SIC 的 $\delta^{13}C$ 总体呈增加趋势。0~100 cm 土层 PIC 占比为 2.12%~27.04%,PIC 含量为 0.49~6.84 g/kg。在 PIC 形成过程中,土壤呼吸产生的 CO_2 含量为 0.07~0.89 g/kg,是土壤固定 CO_2 的主要来源,其占比为 49.72%~62.69%。0~10,10~20,20~40,40~60,60~80,80~100 cm 土层 SOC 向无机碳酸盐的转化量分别为 0.45,0.26,0.16,0.08,0.25,0.04 g/kg。【结论】探明了作物生长季内蒙古农田土壤有机碳向无机碳酸盐的转化特征,为该地区实现“碳中和”提供了参考。

[关键词] 土壤有机碳;作物生长季;有机碳转化;次生碳酸盐;碳稳定同位素;农田土壤

[中图分类号] S153.6 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0165-08

Transformation characteristics of soil organic carbon based on stable isotope technology

YAO Jia[1a,2], WANG Xueren[1a,2], YU Qunjia[1b], LIU Changtao[3], ZHAO Shixiang[1a,2]

(1 a *Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, College of Resources and Environmental Sciences*, b *Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 2 *Key Laboratory of Agricultural Ecological Safety and Green Development of Autonomous Region in Higher Education, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 3 *Inner Mongolia Pratacultural Technology Innovation Central Co. Ltd, Hohhot Inner Mongolia* 010010, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to analyze the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and soil inorganic carbon (SIC) in farmland, and to quantify the conversion of SOC to inorganic carbonate, to provide a reference for farmland soil improvement and probing the carbon cycle process. 【Method】 Soil samples of different soil layers as well as soil CO_2 gas were collected in the Science and Technology Park of Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Autonomous Region, before (May 8) and after (October 12) the growing season of maize in 2023, and the SOC and SIC contents and their stable isotope values ($\delta^{13}C$) were determined by carbon stable isotope techniques. On this basis, the CO_2 source and mass in the process of

[收稿日期] 2025-03-06 [修回日期] 2025-04-07

[基金项目] 国家草业创新技术中心(筹)重大创新平台专项(CCPTZX2023B0302);内蒙古自然科学基金项目(2024LHMS04010)

[作者简介] 姚佳(1998—),女,云南鲁甸人,硕士,主要从事土壤碳研究。E-mail:y20010102j@163.com

[通信作者] 赵世翔(1989—),男,河南新乡人,副教授,硕士生导师,主要从事生物炭土壤固碳研究。E-mail:zhaoshixiang1989@126.com

pedogenic carbonate (PIC) formation in the soil was calculated, and the SOC amount converted to inorganic carbonate during carbon sequestration was explored. 【Result】 During the crop growing season, the SOC content of the 0—100 cm soil layer ranged from 6.01 to 13.38 g/kg, which generally decreased with increasing soil depth. The soil SIC content of the 0—100 cm soil layer ranged from 9.95 to 30.32 g/kg, which showed a trend of initially decreasing, then increasing and finally decreasing with the increasing soil depth. The $\delta^{13}C$ of the SOC and SIC of the 0—100 cm soil layer showed a generally increasing trend. The proportion of PIC in the 0—100 cm layer ranged from 2.12% to 27.04%, and the content of PIC ranged from 0.49 to 6.84 g/kg. During the process of PIC formation, the content of CO_2 produced by soil respiration ranged from 0.07 to 0.89 g/kg, which was the main source of CO_2 fixed by the soil, and the proportion of CO_2 ranged from 49.72% to 62.69%. For 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, and 80—100 cm soil layers, the amount of SOC converted to inorganic carbonate was 0.45, 0.26, 0.16, 0.08, 0.25, and 0.04 g/kg, respectively. 【Conclusion】 The conversion of organic carbon to inorganic carbonate in Inner Mongolia's agricultural soils during the growing season was characterized, providing a reference for the realization of 'carbon neutrality' in the region.

Key words: soil organic carbon; crop growing season; SOC transformation; pedogenic carbonates; carbon stable isotopes; agricultural soils

土壤碳库是陆地生态系统中最大且周转时间最长的碳库[1],其碳储量分别是大气和植物碳库的2和3倍,其极低的改变会引起气候的巨大变化[2]。土壤碳主要包括土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和土壤无机碳(soil inorganic carbon, SIC)。以往有关土壤碳库的研究多集中于对SOC或SIC进行的单一研究[3-4],对SOC向SIC转化的动态过程研究较少。SIC主要指土壤碳酸盐,而土壤碳酸盐主要包括土壤原生碳酸盐(lithogenic carbonate, LIC)和土壤次生碳酸盐[5](pedogenic carbonate, PIC),其中土壤LIC主要来自土壤母质、母岩,指未经风化成土就保存下去的碳酸盐;土壤PIC则指在风化成土过程中形成的碳酸盐,具有拦截CO_2的能力[6]。随着研究的深入,越来越多的学者发现SOC向SIC转化的动态过程直接或间接地影响土壤碳库[7]。因此了解土壤碳的动态变化过程对碳资源的可持续发展有重要意义[8]。

作为陆地生态系统的重要组成部分,受人为因素的影响,农田土壤碳库始终发生着动态变化过程[9]。在作物生长季,土壤生物呼吸作用较强,导致土壤有机碳的矿化速率提高,产生了大量CO_2,CO_2与土壤中的水分发生化学反应形成碳酸溶液,其部分碳酸钙生成了重碳酸盐,随着土壤水分的蒸发,重碳酸盐又重新沉淀成为碳酸盐,即PIC[10]。在此过程中新生成的PIC不但固存了大气中的碳,还固存了有机质分解释放的碳[11],然而在此过程中生成的PIC量、固定的碳量及转移碳量,目前还未见相关报道。本研究以内蒙古自治区呼和浩特市内蒙古农业大学科技园区农田土壤为对象,采用碳稳定同位素技术[12],探讨研究区SOC及SIC的分布特征以及PIC形成过程中固定的碳量,最后定量计算SOC向SIC转化的碳量,旨在为农田土壤改良、准确认识碳循环过程提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于呼和浩特市内蒙古农业大学科技园区农田(40°50′31″ N,112°14′53″ E),平均海拔为1 050 m。土壤类型为潮土,表层土壤有机质含量适中(1.5%~2.5%),氮磷钾含量均衡。该地土壤在黄河冲积物的基础上发育而来。研究区属温带大陆季风性气候,降水多集中于夏季,年均降水约450 mm。试验田内主要种植作物为玉米,作物生长季为5—10月。

1.2 样品采集及处理

于2023年在研究区内随机选取4个5 m×5 m的样方,各样方内按照"S"形设置5个采样点,分别于2023年5月8日(作物生长季前)及10月12日(作物生长季后)采集0~10, 10~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 cm土层土壤,去除草根、石砾等杂质后,将同一个样方内同一深度的土壤混合均匀后,取1 kg装入自封袋带入实验室待测。

在采集土样的同时,将不同长度顶端打孔的PVC管插入相应深度的土层,进行土壤CO_2气体的采集。在进行CO_2采集前,先利用小型抽气泵抽空管内气体并将管口进行密封处理,之后待管内气体

稳定 24 h 后，利用抽气泵抽取管内 CO_2 并装入 500 mL 气袋中进行保存。

1.3　测定指标及其方法

SOC 含量测定采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法，SIC 含量测定采用气量法[13]；土壤有机碳稳定同位素值（$\delta^{13}C_{SOC}$）测定采用盐酸处理法[14]；土壤无机碳稳定同位素值（$\delta^{13}C_{SIC}$）及土壤母质碳稳定同位素值（$\delta^{13}C_{pm}$）测定采用磷酸法[15]；土壤固定的 CO_2 稳定同位素值（$\delta^{13}C_{CO_2}$）采用 Picarrro G2201-i 同位素比率质谱仪进行测定。

碳稳定同位素值（$\delta^{13}C$）代表了土壤和气体样品中两种碳（^{13}C、^{12}C）同位素比率相对于某一标准物两种碳同位素比率的千分差，其计算公式如下：

$$-\delta^{13}C=\left[\frac{\left(^{13}C/^{12}C\right)_{样}}{\left(^{13}C/^{12}C\right)_{标}}-1\right]\times 1\,000‰。\quad(1)$$

式中：标准样品一般为美国南卡罗来纳州白垩系皮狄组地层中的美洲拟箭石，其 $\delta^{13}C=0.011\,24‰$。

在开放的土壤体系中存在着大量的 CO_2 气体，这些气体与土壤中的水分发生化学反应形成碳酸溶液，其溶解部分碳酸钙后生成重碳酸钙，而伴随着土壤水分的蒸发，重碳酸钙又重新沉淀成为碳酸钙。在这一过程中，从 CO_2（气体）到 $CaCO_3$（沉淀）的同位素分馏因子与温度之间存在如下关系[16]：

$$1\,000\ln\alpha_{CO_2\text{-}CaCO_3}=-3.63+1.194\times10^6/T^2。\quad(2)$$

式中：$\alpha_{CO_2\text{-}CaCO_3}$ 为同位素分馏因子平衡常数，T 代表研究区热力学温度。

由式（2）可计算出 $\alpha_{CO_2\text{-}CaCO_3}=10.15‰$。

PIC 稳定同位素值（$\delta^{13}C_{PIC}$）的计算公式[17]为：

$$\delta^{13}C_{PIC}=\delta^{13}C_{SOC}+\Delta_{CO_2,diffusion}+\alpha_{CO_2\text{-}CaCO_3}。\quad(3)$$

式中：$\Delta_{CO_2,diffusion}$ 是 CO_2 扩散引起的 $\delta^{13}C$ 差值，其理论值为 4.4‰。

利用下式可以计算出 PIC 在 SIC 中所占的比例（P）[18]：

$$P=\left[\delta^{13}C_{SIC}-\delta^{13}C_{pm}\right]/\left[\delta^{13}C_{PIC}-\delta^{13}C_{pm}\right]\times100\%。\quad(4)$$

式中：$\delta^{13}C_{SIC}$ 代表土壤无机碳的 $\delta^{13}C$ 值；$\delta^{13}C_{pm}$ 代表土壤母质的 $\delta^{13}C$ 值，本研究中 $\delta^{13}C_{pm}=-0.71‰$。

由公式（4）得到的 P 可计算出 PIC 质量为：

$$m_{PIC}=P\times m_{SIC}。\quad(5)$$

式中：m_{PIC} 为 PIC 的质量，m_{SIC} 为 SIC 的质量。

在碳酸盐沉积之前，HCO_3^- 中的碳有 1/2 来自土壤 CO_2，因此土壤 PIC 形成及重结晶过程中固定的 CO_2 质量可以通过下式计算：

$$N_{CO_2}=1/2\times m_{PIC}/M_{PIC};\quad(6)$$

$$m_{CO_2}=N_{CO_2}\times M_{CO_2}。\quad(7)$$

式中：N_{CO_2} 为 CO_2 的物质的量，M_{PIC} 为 PIC 的摩尔质量，m_{CO_2} 为 CO_2 质量，M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量。

土壤固定的 CO_2 主要来自土壤呼吸作用及大气，因此依据公式（8），可得出来自土壤呼吸及大气的 CO_2 比例为：

$$\delta^{13}C_{CO_2}=\delta^{13}C_{SOC}\times a+\delta^{13}C_{air}\times b。\quad(8)$$

式中：$\delta^{13}C_{air}$ 为当地大气的 $\delta^{13}C$ 值，本研究中 $\delta^{13}C_{air}=-8.96‰$；$a$ 为土壤呼吸作用产生的 CO_2 占总 CO_2 的比例；b 表示来自大气的 CO_2 占总 CO_2 的比例，$b=100\%-a$。

1.4　数据处理与分析

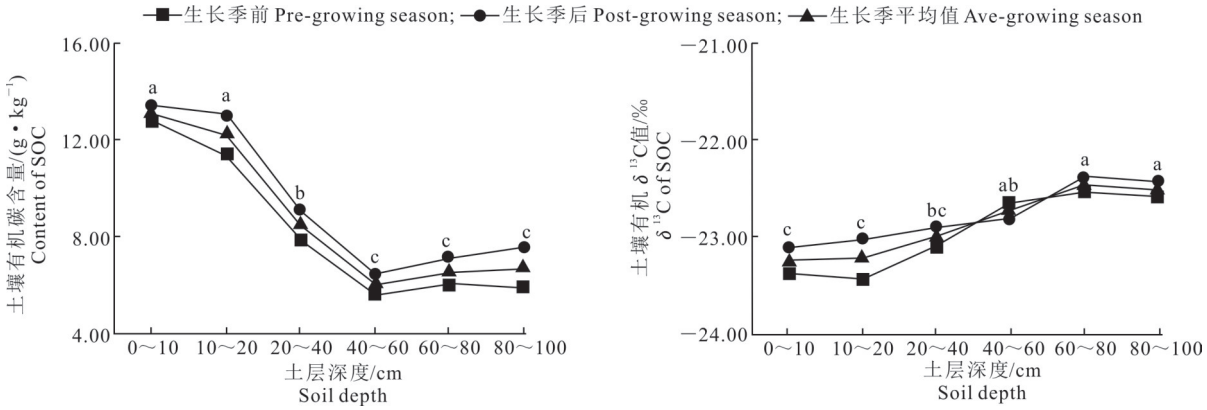
本研究中各指标生长季平均值为生长季前与生长季后的平均值。本研究中所有数据均采用 Excel 2016 进行汇总及初步处理；采用 SPSS 20.0 进行数据差异显著性分析；采用 Origin 2020 绘图。

2　结果与分析

2.1　作物生长季前后土壤 SOC 及其 $\delta^{13}C$ 值的垂直分布特征

图 1 显示，在作物生长季前后，随着土层深度的增加，土壤 SOC 含量呈先降低后增加趋势。在 0～10 cm 土层，SOC 含量最高，平均值为 13.38 g/kg；在 40～60 cm 土层 SOC 含量降至最低，平均值为 6.01 g/kg；随后在 60～80 和 80～100 cm 土层 SOC 含量略有提高，平均值分别为 6.59，6.73 g/kg。土壤 SOC 主要分布在 0～40 cm 土层，其占 1 m 土层 SOC 总含量的 62.70%。在同一土层，相较于作物生长季前，生长季后各土层的 SOC 含量均明显提高，其中 80～100 cm 土层 SOC 含量增加幅度最高，为 28.51%；其次为 60～80 cm 土层，增长幅度为 18.06%；0～10 cm 土层增长幅度最低，仅为 4.34%。

图 1 还显示，在作物生长季前后，SOC 的 $\delta^{13}C$ 值随土层深度的增加总体呈先增高后降低趋势。0～10 cm 土层 SOC $\delta^{13}C$ 值最低，平均值为 −23.24‰；随土层深度增加，SOC $\delta^{13}C$ 值在 60～80 cm 土层达到最大值，平均值为 −22.4‰；随后在 80～100 cm 土层 SOC $\delta^{13}C$ 平均值降低至 −22.51‰。



不同小写字母表示不同土层之间各指标生长季平均值差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences in the mean values of the indicators during the ave-growing season between different soil layers($P<0.05$). The same below.

图1 作物生长季前后土壤有机碳(SOC)及其同位素值($\delta^{13}C$)垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of SOC and its isotopic value before and after the growing season of crops

2.2 作物生长季前后土壤SIC及其$\delta^{13}C$值的垂直分布特征

图2显示,在同一土层,在作物生长季前后0～100 cm土层SIC含量并未出现明显变化;随着土层的加深,SIC含量均先降低后增加再降低。0～10 cm土层SIC含量平均值为25.29 g/kg;随着土层加深,在40～60 cm土层达到最小,平均值为9.95 g/kg;随后在60～80 cm土层SIC含量平均值增至30.32 g/kg;随后在80～100 cm土层SIC含量平均值又降低至23.11 g/kg。

图2还显示,在作物生长季,0～100 cm土层SIC $\delta^{13}C$平均值为$-2.87‰$～$-0.87‰$,并随着土层的加深呈递增的趋势。在同一土层,作物生长季前后SIC $\delta^{13}C$无明显变化。各土层SIC $\delta^{13}C$平均值之间存在显著差异($P<0.05$)。

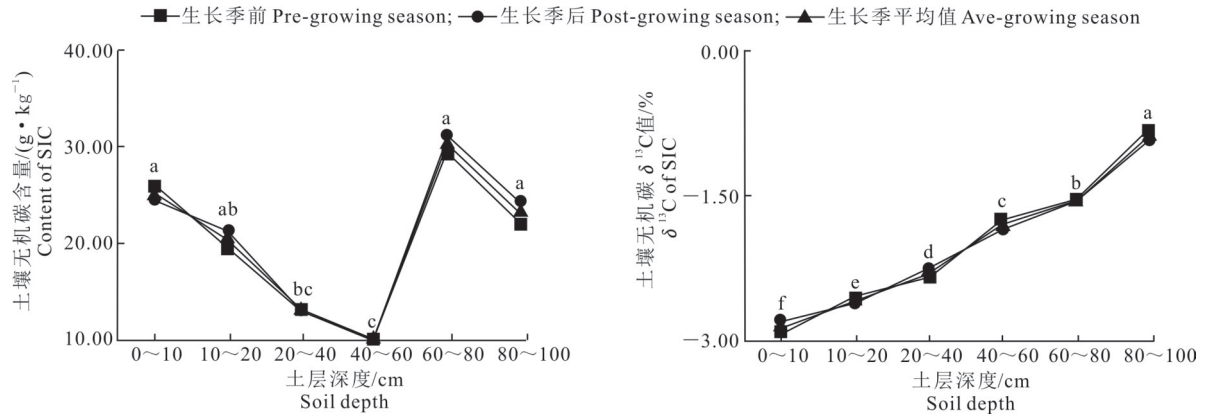


图2 作物生长季前后土壤无机碳(SIC)及其同位素值($\delta^{13}C$)分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of SIC and its isotopic value before and after the growing season

2.3 作物生长季土壤SOC向无机碳酸盐的转化分析

2.3.1 土壤次生碳酸盐(PIC)的稳定同位素值及含量 表1显示,在0～100 cm土层,土壤PIC的$\delta^{13}C$值($\delta^{13}C_{PIC}$)为$-8.69‰$～$-7.91‰$,深层土壤PIC $\delta^{13}C$值高于表层土壤;PIC占比为2.12%～27.04%,PIC含量为0.49～6.84 g/kg,以上2个指标均随土层的加深总体呈降低的趋势。

表1 作物生长季土壤PIC同位素值($\delta^{13}C_{PIC}$)及其含量

Table 1 Soil PIC isotopic values and their content during the growing season of crops

土层深度/cm Soil depth	PIC同位素值/‰ $\delta^{13}C$ of PIC	PIC占比/% Percentage of PIC	PIC含量/(g·kg⁻¹) Content of PIC
0～10	−8.69	27.04	6.84
10～20	−8.68	23.46	4.79
20～40	−8.45	20.60	2.69
40～60	−8.68	13.66	1.36
60～80	−7.91	11.78	3.57
80～100	−7.96	2.12	0.49

2.3.2　SOC 转化为 CO_2 含量　由表 2 可知,0～100 cm 土层土壤固定 CO_2 含量为 0.11～1.51 g/kg,且随着土层的增加总体降低。土壤固定 CO_2 主要来源为土壤呼吸,其占比为 49.72%～62.69%;大气占比为 37.31%～50.28%。

由表 2 还可知,0～10,10～20,20～40,40～60,60～80,80～100 cm 土层来自土壤呼吸的 CO_2 含量分别为 0.89,0.52,0.31,0.16,0.49,0.07 g/kg。研究表明,微生物与植物的呼吸作用约占土壤呼吸作用的 50%,可以推测 SOC 分解产生的 CO_2 含量约占土壤呼吸作用所释放 CO_2 的 50%[19]。因此可以推算 0～10,10～20,20～40,40～60,60～80,80～100 cm 土层 SOC 分解产生的 CO_2 含量分别为 0.45,0.26,0.16,0.08,0.25,0.04 g/kg,即 SOC 向无机碳酸盐的转化量为 0.04～0.45 g/kg。

表 2　作物生长季土壤固定 CO_2 来源及碳转移量

Table 2　Soil fixed CO2 sources during crop growing season and carbon transfer

土层深度/cm Soil depth	土壤固定 CO_2 含量/(g·kg^{-1}) Soil fixed CO_2 content	大气 Atmosphere		土壤呼吸 Soil respiration		有机碳分解产生 CO_2 含量/(g·kg^{-1}) Content of CO_2 of SOC decomposition
		CO_2 含量/(g·kg^{-1}) Content of CO_2	占比/% Percentage	CO_2 含量/(g·kg^{-1}) Content of CO_2	占比/% Percentage	
0～10	1.51	0.62	40.93	0.89	59.07	0.45
10～20	1.05	0.53	50.28	0.52	49.72	0.26
20～40	0.59	0.28	47.9	0.31	52.10	0.16
40～60	0.30	0.14	45.28	0.16	54.72	0.08
60～80	0.78	0.29	37.31	0.49	62.69	0.25
80～100	0.11	0.04	38.26	0.07	61.74	0.04

3　讨　论

3.1　作物生长季 SOC 及其 $\delta^{13}C$ 值分布特征分析

本研究中,在整个作物生长季,SOC 含量随着土层深度的增加总体降低,且 0～40 cm 土层土壤占 0～100 cm 土层总 SOC 含量的 62.70%。这是因为农田土壤 SOC 分布特征易受到动植物残体、土壤剖面发育过程等自然因素[20]以及施肥、灌溉等人为因素[21]的影响。相较于作物生长季前,作物生长季后 0～100 cm 土层土壤 SOC 含量平均增加了 16.00%。这是因为作物生长季后,动植物残体作为有机质源输入至土壤,此时有机质输入量大于消耗量,造成了土壤有机质大量积累。而随着土层的加深,生物活动减弱,植物根系分布减少,土壤有机质来源减少,SOC 含量便越来越低。

本研究发现,随着土层深度的增加,SOC 的 $\delta^{13}C$ 值总体升高。这是因为在植物残体输入土壤之后会导致表层土壤富集 ^{12}C,造成表层土壤 SOC $\delta^{13}C$ 值较低。此外,土壤微生物在分解有机质时,会优先分解利用 ^{12}C[22],导致表层土壤残留有机碳中 ^{13}C 比例逐渐增加;深层土壤因缺氧及低温,有机质分解缓慢,从而导致深层土壤 ^{13}C 富集,$\delta^{13}C$ 值较高[23]。同时,深层土壤内可能包含更为古老的有机碳,这些碳经过长期的分解转化,^{13}C 逐渐富集,导致 SOC $\delta^{13}C$ 值较高[24]。

3.2　作物生长季 SIC 及其 $\delta^{13}C$ 值分布特征分析

土壤 SIC 剖面特征受到生态类型、气候类型[25]、土壤类型[26]等因素的影响。本研究中,在同一土层,作物生长季前后土壤 SIC 含量无明显差异,可知 SIC 具有稳定性。在 0～60 cm 土层,随着土层深度的增加,SIC 含量逐渐降低,这与白曙光[27]在河套灌区农田土壤中的研究结果相似。TAN 等[28]研究发现,水分的垂直迁移会影响 SIC 的分布。本研究区的降雨量少,蒸腾作用较强。在炎热的夏季,随着土壤内水分的蒸发,部分可溶性碳酸盐随着水分向土壤表层迁移,因此 SIC 含量在 0～60 cm 土层逐渐下降。60～80 cm 土层 SIC 含量较 40～60 cm 土层明显增加,这是因为研究区内土壤由黄河冲积物发育而来[29],深层土壤内存在钙积层,所以 SIC 含量骤增。

本研究中,在整个作物生长季,随着土层深度的增加,SIC 的 $\delta^{13}C$ 值逐渐升高。这是因为:(1)在作物生长季,表层土壤温度较高,水分蒸发作用强,碳转移过程中溶解的碳酸氢盐易快速沉淀,此时 CO_2 供应充分但是分馏不完全,导致表层 SIC $\delta^{13}C$ 值较低;(2)土壤微生物在分解有机物时会优先利用 ^{12}C[22],释放出的 CO_2 中以 ^{12}C 为主,与 Ca^{2+} 反应生成的碳酸盐中 ^{13}C 富集程度较低,因而 SIC 的 $\delta^{13}C$ 值较低。

3.3 作物生长季土壤有机碳转化特征分析

3.3.1 PIC分布特征 有研究表明,当SIC中LIC占据优势时,随着土层深度的增加,SIC $\delta^{13}C$值偏正;反之当PIC占据优势时,SIC $\delta^{13}C$值偏负[30]。本研究中,随土层深度的增加,SIC $\delta^{13}C$值偏正,因此说明在研究区土壤SIC内LIC占据优势。DONG等[31]研究发现,内蒙古北部干旱地区的土壤中LIC含量高于PIC,即SIC中LIC占优势,这与本研究结果相同。

本研究发现,随着土层深度的增加,PIC占比逐渐降低。这可能是因为SOC分解产生的CO_2是PIC的重要碳源,随着土层深度的增加,SOC含量总体降低,导致深层土壤CO_2供应不足,一定程度上抑制了PIC的形成。此外,研究区内土壤质地紧密,一定程度上抑制了大气与土壤CO_2的交换,且土层越深,这种抑制作用越强,导致PIC含量及其占比越低。此外,在成土过程中,LIC通过"溶解-迁移-再沉淀"过程形成PIC,但深层土壤由于钙积层的存在,可能阻碍了这一进程的进行,导致深层土壤PIC占比较低。

3.3.2 有机碳转化特征 本研究中,0~100 cm土层SOC向无机碳酸盐的转化量为0.04~0.45 g/kg。SOC是土壤CO_2的主要来源之一[32],其含量变化对土壤CO_2含量有重要影响。一般来说,SOC含量增加,土壤CO_2浓度及相应的土壤酸性溶液也会增加,随之土壤pH降低,促进土下溶蚀作用的发生,影响有机碳的转化过程。童珊等[33]研究发现,SOC含量与SOC转化量呈显著的负相关关系;而本研究发现,SOC含量与SOC转化量整体呈正相关关系,与前人的研究结果不同。这可能是由于童珊等[33]研究的祁连山土壤pH呈弱酸性,而本研究采样地土壤pH呈碱性,从而导致土壤SOC的转化出现了差异。

研究表明,土壤中会因无机肥的施入而存在大量的阳离子,土壤阳离子间的竞争反应会影响SOC向无机碳酸盐的转化[34]。本研究区的生态类型为农田,在SOC转化过程中,SOC分解产生的CO_2与土壤中的NH_4^+、K^+结合,而不与Ca^{2+}、Mg^{2+}离子结合形成碳酸盐,从而抑制了PIC的形成,从而影响了SOC向无机碳酸盐的转化。同时,土壤中存在的微生物也会影响到SOC转化[35],表层土壤内以好氧微生物为主,能够高效分解有机质;而深层土壤微生物以厌氧微生物为主,微生物分解有机质需要能量(ATP),而底层土壤缺乏光照且有机质有限,因此微生物代谢活动受到抑制,导致SOC转化效率降低。

本研究利用碳稳定同位素技术,初步探明了呼和浩特农田土壤内PIC含量以及SOC向无机碳酸盐转化的特征,这为其他研究区SOC向无机碳酸盐转化过程研究提供了参考。但由于土壤碳库始终处于动态变化之中,且影响因素较多,后续应当开展长期定点观测试验,并结合植物学、生态学、气象学等相关学科,以期获得更精准的碳的动态变化规律。

4 结 论

整个作物生长季,研究区0~100 cm土壤PIC含量为0.49~6.84 g/kg;PIC形成过程中固碳CO_2主要来源为土壤呼吸,0~100 cm土层SOC向无机碳酸盐的转化量为0.04~0.45 g/kg。土壤SOC向无机碳酸盐的转化量与SOC含量均随着土层深度的增加而降低,可知二者呈现正相关关系。

本研究首次利用碳稳定同位素技术,对内蒙古自治区潮土农田土壤0~100 cm土层SOC向无机碳酸盐转化特征进行初步探究,该研究将为后续该地区生态修复、生态系统多样性维护以及促进该地区实现"碳中和"提供了参考。

[参考文献]

[1] BHATTACHARYA S S, KIM K H, DAS S, et al. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 167: 214-227.

[2] 尤炜. 干旱土壤无机碳的碳汇研究[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(1): 22-26.
YOU W. Carbon sink of inorganic carbon in arid soil[J]. Environmental Science Survey, 2024, 43(1): 22-26.

[3] 杨文静, 张树兰, 杨学云. 不同管理措施土娄土无机碳储量及其与有机碳含量的关系[J]. 西北农林科技大学学报自然科学版), 2016, 44(9: 74-82.
YANG W J, ZHANG S L, YANG X Y. Effect of long-term soil management and fertilization on storage of soil inorganic carbon and its relationship with soil organic carbon content in plough layer of manual loess soil[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 74-82.

[4] 杨满元, 李娟, 杨宁, 等. 不同植被覆盖方式对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(9): 92-100.
YANG M Y, LI J, YANG N, et al. Effect of different vegetation cover types on soil active organic carbon and humus[J].

Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2023,51(9):92-100.

[5] 张永红,刘飞,钟松. 土壤无机碳研究进展[J]. 湖北农业科学,2021,60(10):5-9,14.
ZHANG Y H,LIU F,ZHONG S. Research progress on soil inorganic carbon[J]. Hubei Agricultural Sciences,2021,60(10):5-9,14.

[6] ZAMANIAN K,PUSTOVOYTOV K,KUZYAKOV Y. Pedogenic carbonates:forms and formation processes[J]. Earth-Science Reviews,2016,157:1-17.

[7] 张林,孙向阳,曹吉鑫,等. 荒漠草原碳酸盐岩土壤有机碳向无机碳酸盐的转移[J]. 干旱区地理,2010,33(5):732-739.
ZHANG L,SUN X Y,CAO J X,et al. Transfer of soil organic carbon to soil inorganic carbon in carbonate rock soil of desert grassland[J]. Arid Land Geography,2010,33(5):732-739.

[8] 张力. 土壤有机碳和无机碳耦合关系研究进展[J]. 安徽农业科学,2017,45(32):121-123,133.
ZHANG L. Research progress of relationship between soil organic carbon and soil inorganic carbon[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2017,45(32):121-123,133.

[9] 王磊,高阳,沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展[J]. 农业工程学报,2024,40(16):1-11.
WANG L,GAO Y,SHEN Z. Research progress on the assessment methods for agricultural soil carbon storage under climate change[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(16):1-11.

[10] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报,2008,(5):901-914.
PAN G X,LI L Q,ZHENG J F,et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica,2008,(5):901-914.

[11] 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 Y M,GONG L,AN S Q,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.

[12] 年世宇,陈孝杨,王校刚,等. 碳同位素技术在陆地土壤碳循环中的应用[J]. 安徽农业科学,2020,48(5):9-13,17.
NIAN S Y,CHEN X Y,WANG X G,et al. Application of carbon isotope technology in terrestrial soil carbon cycle[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2020,48(5):9-13,17.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press,2000

[14] 朱国栋,郭娜,吕广一,等. 围封对内蒙古荒漠草原土壤理化性质及稳定碳氮同位素的影响[J]. 土壤,2020,52(4):840-845.
ZHU G D,GUO N,LÜ G Y,et al. Effects of enclosure on soil physiochemical properties and stable carbon and nitrogen isotopes in Inner Mongolia Desert steppe[J]. Soils,2020,52(4):840-845.

[15] WIJESEKARA H,BOLAN N S,THANGAVEL R,et al. The impact of biosolids application on organic carbon and carbon dioxide fluxes in soil[J]. Chemosphere,2017,189:565-573.

[16] CERLING T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. Earth and Planetary Science letters,1984,71(2):229-240.

[17] CERLING T E,QUADE J,WANG Y,et al. Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators[J]. Nature,1989,341:138-139.

[18] LANDI A,MERMUT A R,ANDERSON D W. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan soils,Canada[J]. Geoderma,2003,117(1/2):143-156.

[19] ROCHETTE P,FLANAGAN L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(2):466-474.

[20] 刘学彤,曹彩云,党红凯,等. 华北平原长期秸秆还田潮土土壤有机碳变化特征[J]. 干旱地区农业研究,2025,43(1):132-138.
LIU X T,CAO C Y,DANG H K,et al. Changes in soil organic carbon under long-term straw in corporation in fluvo-aquic soil of the North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2025,43(1): 132-138.

[21] 陈思宇,律泽,张仰,等. 辽宁省农田土壤有机碳含量特征与影响因素[J]. 生态学杂志,2024,43(9):2769-2776.
CHEN S Y,LÜ Z,ZHANG Y,et al. Variation of soil organic carbon and the influencing factors in croplands of Liaoning Province,China[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(9):2769-2776.

[22] 白雪娟,翟国庆,刘敬泽. ^{13}C 稳定同位素在陆地生态系统植物-微生物-土壤碳循环中的应用[J]. 林业科学,2024,60(7):175-190.
BAI X J,ZHAI G Q,LIU J Z,et al. Application of ^{13}C stable isotopes in plant-microbial-soil carbon cycle in terrestrial ecosystem[J]. Scientia Silvae Sinicae,2024,60(7):175-190.

[23] 陈新,贡璐,李杨梅,等. 典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征[J]. 环境科学,2018,39(10):4735-4743.
CHEN X,GONG L,LI Y M,et al. Spatial variation of soil organic carbon and stable isotopes in different soil types of a typical oasis[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4735-4743.

[24] 张晓艳,徐华,马静,等. 不同地区稻田土壤甲烷氧化碳同位素分馏特征及其影响因素研究[J]. 生态环境学报,2016,25(6):927-933.
ZHANG X Y,XU H,MA J,et al. CH_4 oxidation isotope fractionation and the influences in rice fields in different regions in China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2016,25(6):927-933.

[25] 段星星,刘小龙,韩宝华,等. 黄土高原地区土壤有机碳和无机碳储量及含量特征[J]. 物探与化探,2025,49(1):

239-247.
DUAN X X, LIU X L, HAN B H, et al. Stocks and content of organic and inorganic carbon in soil of the Loess Plateau region [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(1): 239-247.

[26] 阿地来·赛提尼亚孜,段星星,何峻岭,等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤碳储量及其碳密度的分布特征[J]. 物探与化探, 2025,49(1):229-238.
ADILAI S, DUAN X X, He J L, et al. Carbon stocks and carbon density distribution of soil in oases on the northern margin of the Tarim Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(1): 229-238.

[27] 白曙光. 不同盐碱程度土壤无机碳剖面分布特征及固碳潜力[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2018
BAI S G. Profile distribution Characteristics of soil inorganic carbon and carbon sequestration potential in different saline-alkali degree soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2018.

[28] TAN W F, ZHANG R, CAO H, et al. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China[J]. CATENA, 2014, 121: 22-30.

[29] 高美荣,张耀南,康建芳. 基于全国第二次土壤普查出版物的内蒙古土种志数据集[J]. 中国科学数据,2022,7(4):189-199.
GAO M R, ZHANG Y N, KANG J F. A dataset of soil species logs in Inner Mongolia based on the publications of the Second National Soil Survey[J]. China Scientific Data, 2022, 7(4): 189-199.

[30] 陈淼,刘顺,许格希,等. 土壤剖面碳氮稳定同位素自然丰度的垂直分布模式及其影响机制[J]. 应用生态学报,2021,32(6):1919-1927.
CHEN M, LIU S, XU G X, et al. Vertical distribution of natural abundance of stable carbon and nitrogen isotopes along the soil profile and the underlying mechanisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 1919-1927.

[31] DONG L W, RAN J Z, LUO J L, et al. Inorganic carbon pools and their drivers in grassland and desert soils [J]. Global Change Biology, 2024, 30(10): e17536.

[32] 李天,苗淑杰,余洁,等. 凋落物C/N对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态环境学报,2024,33(11):1686-1695.
LI T, MIAO S J, YU J, et al. The influence of litter C/N ratios on soil organic carbon mineralization[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(11): 1686-1695.

[33] 童珊,曹广超,闫欣,等. 祁连山南坡土壤侵蚀定量研究与影响因素分析[J]. 水土保持研究,2022,29(5):100-107,116.
TONG S, CAO G C, YAN X, et al. Quantitative study on soil erosion and its influencing factors on the south slope of Qilian Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 100-107, 116.

[34] 朱鑫宇,卢韦,李渝,等. 恒温和变温模式下不同施肥黄壤有机碳矿化特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023,29(12):2208-2218.
ZHU X Y, LU W, LI Y, et al. Characteristics and controlling factors of yellow soil organic carbon mineralization in different fertilization treatments under constant and variable temperature regimes[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(12): 2208-2218.

[35] 郑佳舜,胡钧铭,韦翔华,等. 绿肥压青对粉垄稻田土壤微生物量碳和有机碳累积矿化量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021,29(4):691-703.
ZHENG J S, HU J M, WEI X H, et al. Effects of green manure returning on soil microbial biomass carbon and mineralization of organic carbon in smash ridging paddy field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 691-703.

(责任编辑:李小平)