

活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的研究

龙娟, 廖宇琴, 文首鑫, 木志坚, 杨志敏

引用本文:

龙娟, 廖宇琴, 文首鑫, 等. 活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 1133-1140.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1247>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探

管伟豆, 肖然, 李荣华, 刘翔宇, 潘君庭, 黄永春, 张增强, 郭堤

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 969-977 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1151>

不同地区农田土壤多环芳烃污染特征与来源解析

刘月仙, 解小凡, 杜志伟, 邱慧, 张瑞丽, 张萌, 王伟

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2539-2547 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0448>

围垦对滨海稻田土壤 N_2O 还原潜力的影响

汪方圆, 张耀鸿, 饶旭东, 谢晴, 贾仲君

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2668-2674 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0533>

三格式化粪池出水水质特征及对周边土壤环境的影响

蒯伟, 李厚禹, 高艺, 杨波, 张春雪, 徐艳, 郑向群

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1051-1061 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1231>

畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

袁凯, 熊苏雅, 梁静, 李彦明, 乔玉辉, 李花粉, 陈清

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1837-1842 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0142>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

龙娟, 廖宇琴, 文首鑫, 等. 活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1133–1140.

LONG Juan, LIAO Yu-qin, WEN Shou-xin, et al. Organic carbon fixation by iron and aluminum reactive minerals in farmland soil[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(5): 1133–1140.



开放科学 OSID

活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的研究

龙娟^{1,2}, 廖宇琴^{1,2}, 文首鑫^{1,2}, 木志坚^{1,2,3*}, 杨志敏^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 农业部西南耕地保育重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 为了解活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的贡献, 量化了重庆西部地区不同土壤类型与耕作制度下 61 个典型农田土壤的表层(0~30 cm)、中层(30~60 cm)、底层(60~100 cm)3 层的活性铁铝矿物所固定的有机碳量(OC_{Fe-Al})。结果表明: OC_{Fe-Al} 表现为表层(均值 $2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>中层(均值 $1.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>底层(均值 $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); OC_{Fe-Al} 占土壤总有机碳的范围为 12.8%~83.6%。3 层土壤的活性铁铝矿物平均固碳量, 在不同土壤类型中, 石灰岩土最高($1.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 紫色土最低($1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 在不同耕作制度中, 水旱轮作用地最高($1.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 旱作用地最低($1.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 在不同地形中, 陡坡地最低($0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平地($1.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与缓坡地($1.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)较高; OC_{Fe-Al} 与土壤 Fe、Al 及 TOC 含量呈显著正相关($P < 0.01$), 与土壤 pH 呈显著负相关($P < 0.01$)。总体而言, 活性铁铝矿物固碳是土壤固碳的重要机制且对底层土壤碳库的贡献率更大; 而土壤类型、耕作制度、土壤 pH 等均会影响活性铁铝矿物对土壤有机碳的固定。

关键词: 农田土壤; 活性铁铝矿物; 土壤固碳; 土壤类型; 耕作制度

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)05-1133-08 doi:10.11654/jaes.2020-1247

Organic carbon fixation by iron and aluminum reactive minerals in farmland soil

LONG Juan^{1,2}, LIAO Yu-qin^{1,2}, WEN Shou-xin^{1,2}, MU Zhi-jian^{1,2,3*}, YANG Zhi-min^{1,2}

(1. College of Resource & Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3. Key Laboratory of Arable Land Conservation for Southwest China, Ministry of Agriculture, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to understand the contribution of organic carbon retained by iron and aluminum reactive minerals in farmland soils, the amount of organic carbon fixed by the iron and aluminum reactive minerals (OC_{Fe-Al}) on the surface layer(0~30 cm), middle layer(30~60 cm), and bottom layer(60~100 cm) of 61 typical farmland soils of different soil types and farming systems in western Chongqing was quantified. The results showed that: OC_{Fe-Al} was in the following order: surface layer(mean $2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>middle layer(mean $1.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)>bottom layer(mean $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), accounting for 12.8%~83.6% of the total soil organic carbon. The average OC_{Fe-Al} in the three soil layers was the highest in limestone soils ($1.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and lowest in purplish soils ($1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) among different soil types. The paddy-upland rotation crop displayed the highest OC_{Fe-Al} ($1.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) in different tillage systems, whereas the uplands had the lowest ($1.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). In terms of terrain, gentle-sloped and flat land had the highest OC_{Fe-Al} and steep-sloped land the lowest (1.54 , $1.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively). The carbon sequestration of iron- and aluminum-bearing reactive minerals was significantly positively correlated with Fe, Al, and soil total organic carbon contents ($P < 0.01$) and negatively correlated with soil pH ($P < 0.01$). In general, the carbon sequestration of iron and aluminum reactive minerals is an important mechanism for soil carbon sequestration and contributes more to the bottom soil carbon pool. Soil type and the farming system will affect the iron and aluminum reactive minerals' ability to fix soil organic carbon.

Keywords: farmland soil; iron and aluminum reactive minerals; carbon sequestration; soil type; tillage system

收稿日期: 2020-10-28 录用日期: 2021-01-11

作者简介: 龙娟(1995—), 女, 重庆北碚人, 硕士研究生, 从事土壤环境保护和农田温室气体排放研究。E-mail: 411051898@qq.com

*通信作者: 木志坚 E-mail: muzj@swu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371211); 国家重点研发项目(2018YFD0800606)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41371211); National Key R&D Program of China(2018YFD0800606)

由于人类过度使用化石燃料,大气中 CO_2 浓度从工业化前的 $280 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 上升到2018年的 $407 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在过去的10 a中,人们观察到的 CO_2 浓度以每年 $2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的速度增长,约为自然变化速度的100倍^[1-3]。同时,随着经济的快速发展,温室气体的排放仍将持续升高^[4-5]。土壤有机碳库作为全球陆地生态系统中最大的碳库,其碳含量(约1 550 Gt)远高于大气碳库与陆地植被碳库^[6-8],其微小的变化就会导致大气中 CO_2 浓度发生较大波动,土壤固定碳的能力在很大程度上决定着大气中 CO_2 的浓度^[8-11]。因此,增加土壤固碳量是降低土壤碳排放的有效措施。

有机碳在土壤中的固定主要通过以下3种方式:一是物理保护作用,即有机碳与土壤团聚体等发生闭塞、嵌入作用;二是化学保护作用,即土壤矿物通过配位体交换、范德华力和高阶阳离子键桥等作用固定土壤有机碳;三是生物化学保护作用,即有机碳通过自身的分子组成产生的抗降解性^[12-13]。土壤活性铁铝矿物(如水铝英石、水铁矿、铁铝水合氧化物等)^[14]作为土壤矿物的重要组成部分,是土壤中最常见的次生矿物,其表面活性高,常以配位交换、阳离子架桥等方式固定有机碳。目前,已经有大量研究发现铁铝矿物对沉积物^[15]、冻土^[16]、森林土壤^[17]和农业土壤的有机碳固定起着重要作用^[18-19]。

Aran等^[20]对水稻土壤的研究发现与铁铝结合的有机碳具有较高的稳定性。周萍等^[21]对南方典型稻田土壤团聚体中有机碳的结合状态进行分析发现,稻田土壤中的有机碳主要以铁铝结合态有机碳在土壤中固存。Huang等^[18]的研究表明,施有机肥可以有效提高水稻土的铁矿物固碳量。尽管现有的研究表明活性铁铝矿物固碳是农田土壤中碳长期积累的重要机制,但目前还是缺少对不同耕作制度与土壤类型下的农田土壤中活性铁铝矿物固碳的定量分析及影响因素的研究。

渝西地区耕地面积约 $1.19 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全市耕地总面积的46.53%,是重庆市的农业主产区^[22-23],其土壤类型和种植作物类型基本涵盖了重庆地区主要土壤类型和作物品种,具有一定的代表性。选择渝西典型农田土壤作为研究对象,量化渝西不同地区的农田土壤中活性铁铝矿物固碳量($\text{OC}_{\text{Fe-Al}}$),并探讨不同耕作制度与土壤类型下农田土壤TOC、 $\text{OC}_{\text{Fe-Al}}$ 的差异性特征,对于深刻认识土壤碳的固持状态及其可持续管理具有重要意义。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

研究区为渝西地区($105^\circ 17' 25'' \sim 107^\circ 27' 33'' \text{ E}$, $28^\circ 27' 28'' \sim 30^\circ 50' 03'' \text{ N}$),包括北碚、合川、璧山、潼南、铜梁、大足、荣昌、永川、江津、綦江、南川11个区县,其总面积约为 $19\,580 \text{ km}^2$,海拔在168~900 m,属于典型的亚热带季风性湿润气候,年均气温为15~18 $^\circ\text{C}$,年均降雨量为1 000~1 210 mm,是重庆市的农业主产区。

1.2 土壤样品采集

以土壤分布比例为基础,按照区县和土壤类型确定采样点(图1),选择远离工业区和城区的典型农田作为样地,按0~30、30~60 cm和60~100 cm深度分层采样。样品采集遵守等量、随机和多点混合的原则,每个剖面同一层次、不同位置分别采集4个样品作为该层的混合土样。本研究共计61块采样地,183个剖面土样。样地按土壤类型分,包括紫色土25块、水稻土20块、石灰岩土4块、黄壤5块、潮土7块;按耕作制度分,包括旱地41块、水田8块、水旱轮作12块;按作物类型分,长期种植C3作物的有26块、C4作物4块、C3和C4作物轮作31块(附表1,扫描文章首页OSID码浏览)。

1.3 土样分析

将采集的土壤样品自然风干后,去除其中的石砾、动植物残体等杂质,按四分法取样,研磨后,过10目和200目筛。

1.3.1 pH的测定

称取过10目筛的土样2.000 g,加入10 mL纯水,用雷磁PHS-3E型pH计测定土壤pH值。

1.3.2 总有机碳(TOC)的测定

称取 $\text{pH} > 6.5$ 的过200目筛的土样0.500 g,加入过量 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸,反应24 h以去除土壤中的碳酸盐,低温烘干后用元素分析仪(Elementar Vario Pyro Cube)测定土样总有机碳含量。 $\text{pH} < 6.5$ 的土样不经过盐酸处理,直接称样测定^[17]。

1.3.3 $\text{OC}_{\text{Fe-Al}}$ 的测定

活性铁铝矿物固定的有机碳参考Kramer等^[14]的方法进行提取,具体步骤如下:称取过10目筛的土样1.000 g,加入事先调节pH至7.3的 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 连二亚硫酸钠- $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 焦磷酸钠混合溶液(简称DP溶液)20 mL。50 $^\circ\text{C}$ 水浴30 min,每隔5 min振荡一次。用碳氮分析仪(Multi N/C 2100)测定浸提后溶液中有

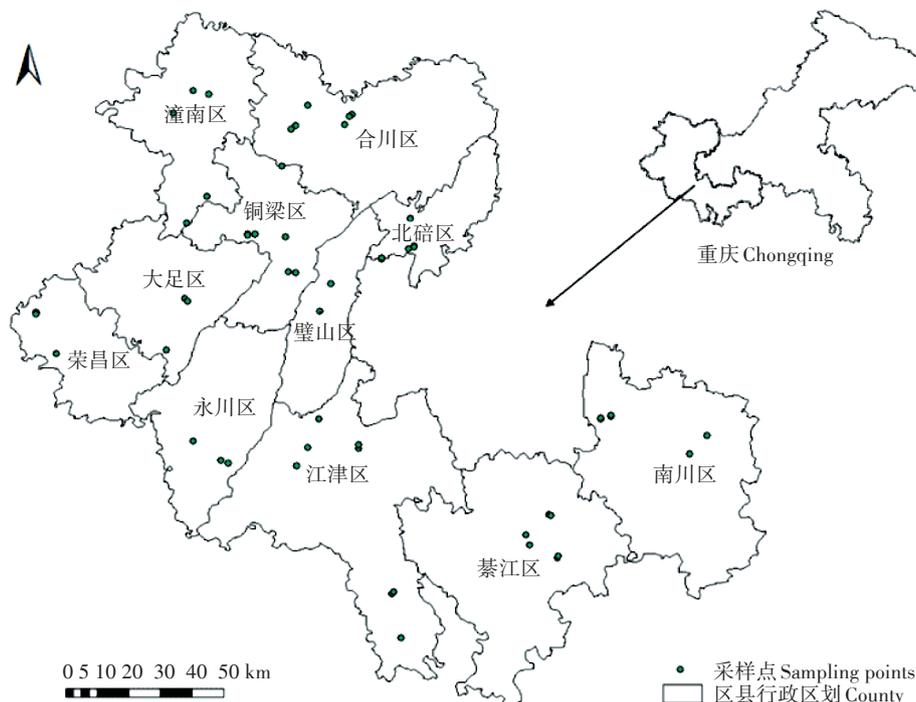


图1 渝西地区采样点分布

Figure 1 Distribution map of sampling points in western Chongqing

机碳含量(OC_A),每个样品测3组平行。改用纯水,以上述同样步骤测定水溶性有机碳含量(OC_w)。同时,测定DP溶液的有机碳含量(OC_{DP})。则 $OC_{Fe-Al}=OC_A-OC_w-OC_{DP}$ 。

用石墨炉-原子吸收分光光度计(AA-6880G)测定上述两种浸提后溶液中的Fe、Al含量。

1.4 气象及地形参数

采样点的经纬度及海拔高度信息由GPS仪采集记录。采样点的坡度信息以重庆地区分辨率 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的数字高程模型(DEM)为源数据,由ArcGIS 10.2的3D Analyst模块计算获得(DEM数据由成都水经注信息科技有限公司提供);根据我国《土地利用现状调查技术规程》对耕地坡度进行划分^[24],坡度 $\leq 6^\circ$ 的土地为平地, $6^\circ \sim 25^\circ$ 为缓坡地, $>25^\circ$ 为陡坡地。

1.5 数据分析

运用Origin 8.0对数据结果进行作图,利用SPSS 22.0对 OC_{Fe-Al} 与土壤理化性质进行Pearson相关性分析,采用单因素方差分析(ANOVA)加多重比较(LSD)法分析不同土壤类型、耕作制度、地形下TOC、 OC_{Fe-Al} 及 OC_{Fe-Al}/TOC 的差异。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳的剖面分布特征

表1为渝西地区土壤总有机碳(TOC)、活性铁铝

矿物固碳量(OC_{Fe-Al})以及水溶性有机碳(OC_w)的剖面分布特征。表层、中层、底层土壤TOC含量范围分别为2.23~18.20、1.42~10.60、0.89~7.77 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值分别为8.05、4.64、3.03 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表层、中层、底层土壤 OC_{Fe-Al} 范围分别为0.60~3.94、0.51~2.88、0.47~2.28 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值分别为2.02、1.37、1.14 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。表层、中层、底层土壤中 OC_w 含量范围分别为0.06~0.38、0.02~0.27、0~0.23 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值分别为0.19、0.10、0.07 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。TOC、 OC_{Fe-Al} 以及 OC_w 量均表现为表层>中层>底层。

对比可以看出,3个土层的 OC_{Fe-Al} 都远高于水溶性有机碳量, OC_{Fe-Al} 占土壤总有机碳的12.8%~83.6%,3层平均为35.4%,而水溶性有机碳只占土壤总有机碳的0.1%~11.6%,3层平均为2.6%。结果表明,40%左右的土壤有机碳以活性铁铝矿物固定的方式贮存在土壤中,铁铝矿物在提高土壤碳储量上具有重大潜力。

活性铁铝矿物固碳量在总有机碳中的占比(OC_{Fe-Al}/TOC)表现为底层(均值为46.4%)>中层(均值为33.5%)>表层(均值为26.5%),随着土壤深度增加呈上升趋势。底层土中被铁铝矿物固定的有机碳占比显著高于表层、中层土壤($P < 0.01$),说明底土在增加土壤有机碳储量上有不可忽视的作用。Rachel等^[25]的研究表明金属矿物与有机碳的复合体不会在表层土壤中持续存在且可以在土壤剖面中迁移,这可能是底土 OC_{Fe-Al}/TOC 更高的原因。同时,Bai等^[26]的

表1 渝西地区土壤 TOC、OC_{Fe-Al} 以及 OC_w 的剖面分布特征 (g·kg⁻¹)Table 1 Distribution characteristics of TOC and OC_{Fe-Al} and OC_w profile in western Chongqing (g·kg⁻¹)

土层 Layer/cm	样品数量 Sample number	TOC			OC _{Fe-Al}			OC _w		
		范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%
0~30	61	2.23~18.20	8.05±2.80	34.7	0.60~3.94	2.02±0.70	34.6	0.06~0.38	0.19±0.06	31.5
30~60	61	1.42~10.60	4.64±2.14	46.1	0.51~2.88	1.37±0.47	34.3	0.02~0.27	0.10±0.04	40.0
60~100	61	0.89~7.77	3.03±1.72	56.7	0.47~2.28	1.14±0.35	30.7	0~0.23	0.07±0.03	42.8

研究表明,在淀积层土壤中,铁铝矿物对土壤有机碳固定的贡献最大,而在淋溶层土壤中固碳主要是硅酸盐矿物,所以底土的 OC_{Fe-Al}/TOC 更大。这可能指示了种植具有深生根形状的农作物或者深耕土壤在提高土壤有机碳储量上具有一定可行性。

2.2 土壤理化性质对 OC_{Fe-Al} 的影响

对土壤 OC_{Fe-Al} 与土壤理化性质进行相关性分析(表2),结果表明,土壤 OC_{Fe-Al} 和 Fe、Al 含量均呈显著正相关($P<0.01$)。Chasse 等^[27]的研究表明,铁铝矿物的形态与含量都与土壤固碳量密切相关,铁铝氧化物含量越高,土壤固碳量越高。土壤中铁铝矿物的含量越高,土壤对有机碳的固定量越高^[28-29]。

土壤 OC_{Fe-Al} 和 pH 之间呈显著负相关($P<0.01$)。即随着土壤 pH 的增加,OC_{Fe-Al} 呈现减少的趋势。这与 Saidy 等^[29]、Mayes 等^[30]的研究结果相同,其原因是土壤 pH 的降低会使得土壤活性铁、铝含量增加^[31],同时还会影响矿物表面的电荷,调节有机碳的酸性官能团,从而促进矿物与有机碳的相互作用^[18]。

土壤 OC_{Fe-Al} 和 TOC 之间呈显著正相关($P<0.01$),随着土壤 TOC 的增加,OC_{Fe-Al} 呈现增加趋势。这与 Moore 等^[32]的研究结果相同。这表明,在采用秸秆还田等保护性农业管理措施时,能在一定程度上增加土壤 OC_{Fe-Al}^[10,33],提高土壤有机碳稳定性。

2.3 不同土壤类型对 OC_{Fe-Al} 的影响

本研究的土壤类型包括紫色土、石灰岩土、黄壤、潮土以及水稻土。各层土壤的 OC_{Fe-Al} 的大小有一定

差异(图2a)。整体而言,3层土壤的 OC_{Fe-Al} 表现为石灰岩土最高,平均为 1.83 g·kg⁻¹,紫色土最低,平均为 1.39 g·kg⁻¹。研究区不同土壤类型的 OC_{Fe-Al} 在3个土壤剖面中存在差异;表层土中,石灰岩土显著高于紫色土、黄壤和潮土($P<0.05$),具体表现为石灰岩土>水稻土>黄壤>潮土>紫色土。中层土中,表现为石灰岩土>黄壤>水稻土>紫色土>潮土,但不同类型间差异未达显著水平。各土壤类型的底层土壤 OC_{Fe-Al} 差异均未达到显著性水平。不同剖面上,黄壤、石灰岩土和水稻土的 OC_{Fe-Al} 3层之间均存在显著性差异($P<0.05$),而紫色土、石灰岩土、潮土及水稻土的表层 OC_{Fe-Al} 与中层、底层均有显著差异($P<0.05$),但中层、底层间 OC_{Fe-Al} 差异不显著。

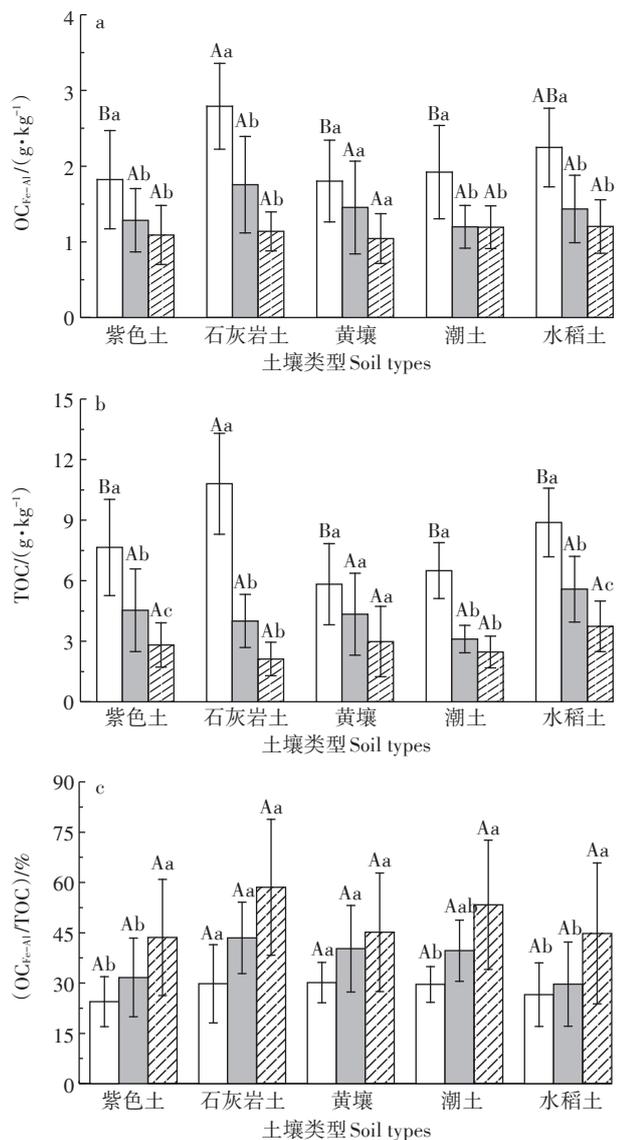
不同土壤类型的 TOC、OC_{Fe-Al} 及 OC_{Fe-Al}/TOC 表现出相似的趋势(图2),说明各土壤类型间 OC_{Fe-Al} 的差异主要不是由 TOC 含量决定的。除底层土外,石灰岩土中 OC_{Fe-Al} 的含量显著高于其他土壤类型,且 OC_{Fe-Al}/TOC 在3层中均为最高。石灰岩土中含有更多的 Ca²⁺,钙能够以三元络合物的形式促进铁矿物对有机碳的固定^[34]。Sowers 等^[35]分析了在无钙和有钙的情况下,铁矿物吸附的有机碳量,显示其吸附有机碳量与 Ca²⁺ 高度相关($R^2=0.91$)且能促进芳香族和酚类部分的吸附;其研究表明 Ca²⁺ 与有机碳具有很高的共缔合作用,能够增加结晶性差的铁矿物对有机碳的吸附。Setia 等^[36]的研究结果也表明 Ca²⁺ 能够强烈促进有机碳与矿物表面的桥连,减少有机碳淋失,提高土壤固碳量。同时,分析发现,石灰岩土相比其他土壤类型而言,铝含量显著高,铁含量无显著差异(附表2,扫描文章首页 OSID 码浏览)。因此,其 OC_{Fe-Al} 的含量高于其他土壤类型的原因可能是更多的铝矿物与有机碳间的固定作用。其次,石灰岩土的 TOC 是显著高于其他土壤类型的(图2b),由于 OC_{Fe-Al} 与 TOC 呈显著正相关(表1),所以石灰岩土的 OC_{Fe-Al} 的含量更高。

2.4 不同耕作制度对 OC_{Fe-Al} 的影响

研究区内耕作制度有3种:水田、旱地以及水旱

表2 土壤理化性质与 OC_{Fe-Al} 的相关性分析Table 2 Correlation analysis between soil physical and chemical properties and OC_{Fe-Al}

土壤性质 Soil properties	OC _{Fe-Al}	
	r 值 r value	P 值 P value
Fe	0.193	<0.01
Al	0.325	<0.01
pH	-0.440	<0.01
TOC	0.716	<0.01



□ 表层 Surface layer ■ 中层 Middle layer ▨ 底层 Under layer

不同大写字母代表相同土层不同土壤类型间差异显著($P<0.05$);
不同小写字母代表相同土壤类型不同土层间差异显著($P<0.05$)
Different uppercase letters indicate significant differences among soil
types in the same layer($P<0.05$); different lowercase letters indicate
significant differences among layers in the same soil type($P<0.05$)

图2 不同土壤类型下 OC_{Fe-Al} 、TOC及 OC_{Fe-Al}/TOC 的剖面分布特征

Figure 2 Profile distribution characteristics of OC_{Fe-Al} , TOC and OC_{Fe-Al}/TOC in different soil types

轮作用地。不同耕作制度对土壤 OC_{Fe-Al} 的影响因土壤深度不同而有所差异,表层土壤 OC_{Fe-Al} 表现为水旱轮作>水田>旱地;中层为水旱轮作>旱地>水田;底层为水田>旱地>水旱轮作(图3a)。3层土壤的 OC_{Fe-Al} 表现为水旱轮作用地最高,平均为 $1.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,旱地最低,平均为 $1.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水旱轮作用地的 OC_{Fe-Al} 在表层、中

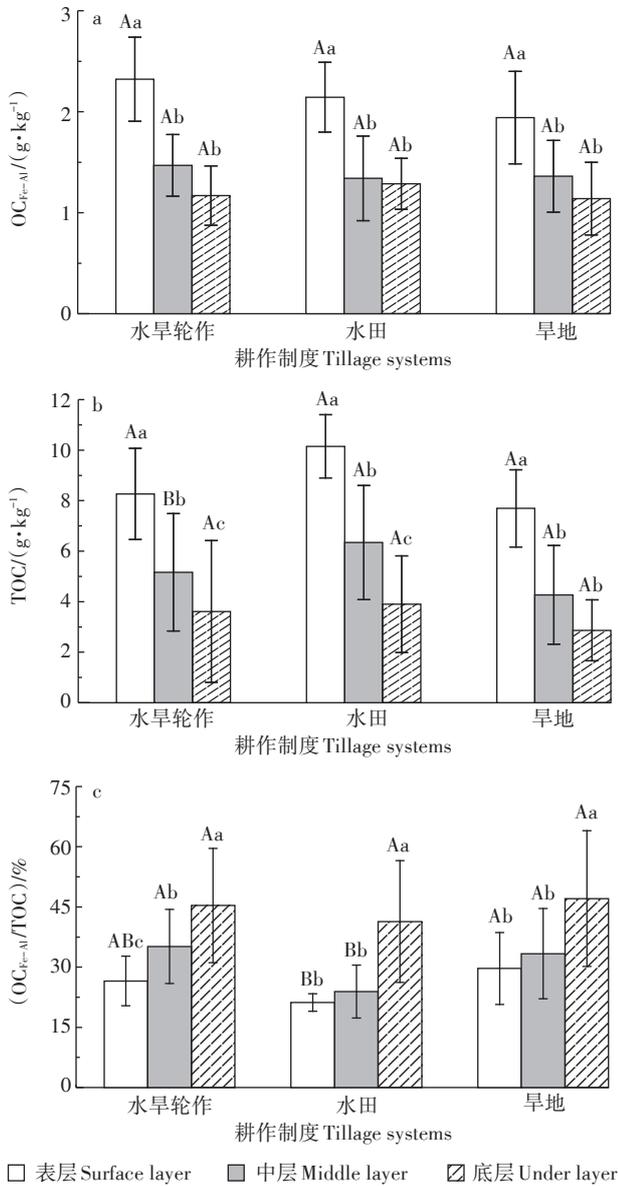
层土壤中高于水田与旱地,而中层、底层土的 OC_{Fe-Al} 在不同耕作制度下均无显著差异。不同剖面上,表层与中层、底层之间 OC_{Fe-Al} 存在显著性差异($P<0.01$),而中层与底层土壤中 OC_{Fe-Al} 的差异未达显著水平。

图3c中, OC_{Fe-Al}/TOC 在3个土壤剖面上均表现为水旱轮作>旱地>水田,这表明了在输入相同的有机碳情况下,水田的 OC_{Fe-Al} 最低,水旱轮作用地最高,即在这3种耕作制度中, OC_{Fe-Al} 对水旱轮作土壤碳库的贡献率最大。水旱轮作用地 OC_{Fe-Al} 较高的原因,首先可能是水旱轮作的pH低于旱地和水田(附表3,扫描文章首页OSID码浏览),在酸性土壤中,较低的pH条件更利于有机-矿物复合体的形成^[18];其次,水田的完全厌氧环境会导致还原反应,更易于有机碳结合的三价铁矿物还原,破坏Fe-OC复合体的结构,所以尽管水田的TOC含量最高(图3b),但其 OC_{Fe-Al} 低于水旱轮作^[37-38]。水旱轮作的干湿交替过程还会导致特殊的氧化还原电位波动,增强土壤矿物的还原风化和淋溶过程,铁、铝等元素离析而浓聚,使游离氧化铁铝矿物积累,在这个过程中,有机质与矿物的相互作用更加活跃^[39]。最后,由于活性铁铝矿物对含有不同官能团的有机碳的固定能力不同,其更易吸附疏水性强的芳香族组分和含羧基官能团的组分^[40-41],因此输入土壤的有机碳官能团种类及疏水性等^[40]也会影响铁铝矿物固碳。

2.5 不同地形对 OC_{Fe-Al} 的影响

平地 OC_{Fe-Al} 范围为 $1.19\sim 2.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $1.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;缓坡地 OC_{Fe-Al} 范围为 $1.14\sim 2.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $1.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;陡坡地 OC_{Fe-Al} 范围为 $0.88\sim 1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 $0.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图4);陡坡地 OC_{Fe-Al} 在表层、中层、底层都显著低于平地与缓坡地($P<0.05$),而缓坡地与平地间无显著差异。在不同剖面上,3种坡度土壤的表层与中层、底层土 OC_{Fe-Al} 均有显著差异($P<0.05$),除缓坡地外,中层、底层土壤 OC_{Fe-Al} 无显著差异。

从图4可以看出,土壤 OC_{Fe-Al} 、TOC及 OC_{Fe-Al}/TOC 的平均变化趋势基本一致,表现为平地>缓坡地>陡坡地。分析发现,3种地形下,土壤的pH、Fe、Al含量均无明显差异(附表4,扫描文章首页OSID码浏览),而缓坡地的TOC显著低于平地与缓坡地,有研究表明在水土流失严重的情况下,土壤有机碳的数量和组分等特征会受到不同程度的影响^[42],而活性铁铝矿物对含有不同类型有机碳的固定能力有差异,陡坡地相较于平地与缓坡地,水土流失严重,导致土壤TOC含量以及组分与平地和缓坡地存在差异,这可能是缓坡

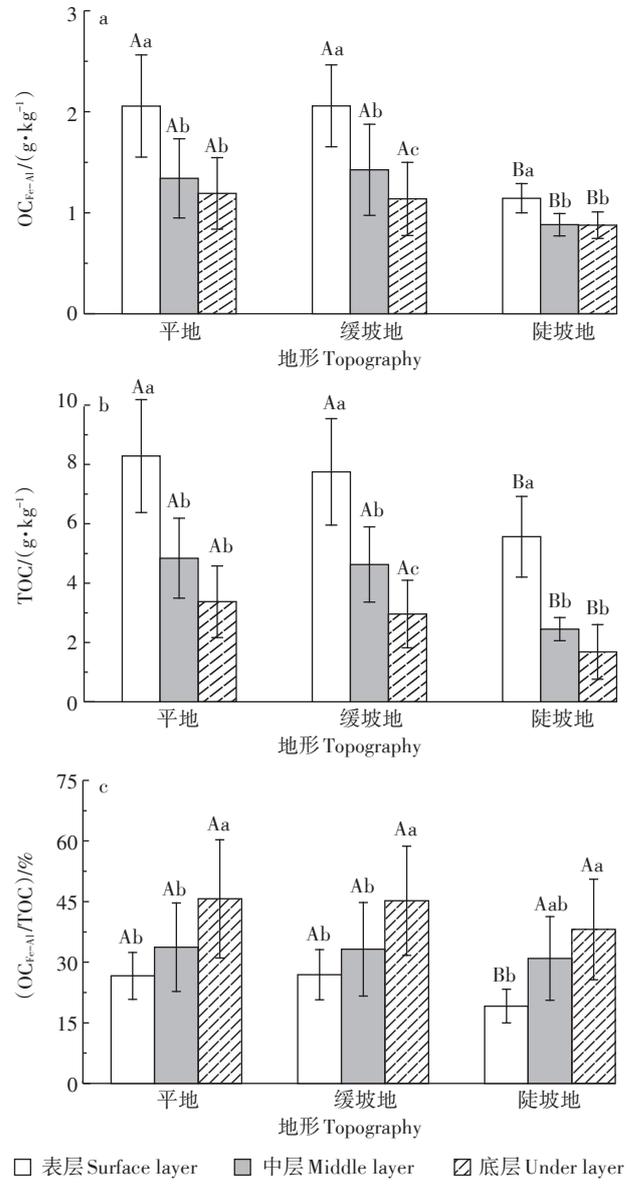


不同耕作制度下 OC_{Fe-Al} 、TOC 及 OC_{Fe-Al}/TOC 的剖面分布特征
Figure 3 Profile distribution characteristics of OC_{Fe-Al} , TOC and OC_{Fe-Al}/TOC in different tillage systems

地的 OC_{Fe-Al} 低于平地与缓坡地的原因。

3 结论

(1)平均而言,活性铁铝矿物固碳量占渝西农田土壤总有机碳的 35.4%,是农田土壤碳库的重要组成部分,表明活性铁铝矿物固碳对提高土壤碳库具有



不同地形下 OC_{Fe-Al} 、TOC 及 OC_{Fe-Al}/TOC 的剖面分布特征
Figure 4 Profile distribution characteristics of OC_{Fe-Al} , TOC and OC_{Fe-Al}/TOC in different topographies

重要意义。

(2)土壤类型、耕作制度、地形的不同会影响活性铁铝矿物对有机碳的固定。在本研究中,石灰岩土中的活性铁铝矿物平均固碳量最高,紫色土最低;水旱轮作用地的活性铁铝矿物平均固碳量最高,旱作用地最低;陡坡地中的活性铁铝矿物平均固碳量最低,平地与缓坡地无明显差异。

(3)活性铁铝矿物固碳量与土壤 TOC、Fe 和 Al 含量均呈显著正相关($P<0.01$),与土壤 pH 呈显著负相关($P<0.01$)。

参考文献:

- [1] 张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 418-428. ZHANG Zhi-yong, YU Xu-hao, XIONG Shu-ping, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 418-428.
- [2] 张枝盛, 汪本福, 李阳, 等. 氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1400-1408. ZHANG Zhi-sheng, WANG Ben-fu, LI Yang, et al. Effects of different nitrogen regimes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1400-1408.
- [3] Tiwari S K, Giri B S, Thivaharan V, et al. Sequestration of simulated carbon dioxide (CO₂) using churning cementations waste and fly-ash in a thermo-stable batch reactor(TSBR)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(22): 27470-27479.
- [4] Sandra Ó, Snæbjörnsdóttir, Bergur S, et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 90-102.
- [5] Knutti R, Rogelj J, Sedláček, et al. A scientific critique of the two-degree climate change target[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 13-18.
- [6] 李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 等. 秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与 CO₂ 排放的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2535-2543. LI Bin-bin, WU Lan-fang, XU Yan-yan. Relationship between functional groups of soil dissolved organic carbon and CO₂ emissions with crop residues incorporation to soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2535-2543.
- [7] 窦永静. 增温对大兴安岭泥炭地大中型土壤动物群落及温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 12-15. DOU Yong-jing. Effects of warming on macro-and meso-soil fauna community and greenhouse gas emissions in the peatland, Great Hing'an Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 12-15.
- [8] 王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774-1782. WANG Xue-xia, ZHANG Lei, LIANG Li-na, et al. Effects of straw returning on the stability of soil organic carbon in wheat-maize rotation systems [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1774-1782.
- [9] Jing T Y, Xiang B K. Modeling the effects of land-use optimization on the soil organic carbon sequestration potential[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(11): 1641-1658.
- [10] Dungait J A, Hopkins D W, Gregory A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1781-1796.
- [11] Hunt J R, Celestina C, Kirkegaard J A. The realities of climate change, conservation agriculture and soil carbon sequestration[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3188-3189.
- [12] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant & Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [13] 徐基胜, 赵炳梓. 可溶性有机碳在典型土壤上的吸附行为及机理[J]. 土壤, 2017, 49(2): 314-320. XU Ji-sheng, ZHAO Bing-zi. Mechanisms of dissolved organic carbon adsorption on different typical soils in China[J]. *Soil*, 2017, 49(2): 314-320.
- [14] Kramer M G, Chadwick O A. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1104-1108.
- [15] Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, et al. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron[J]. *Nature*, 2012, 483: 198-200.
- [16] Salvadó, Joan A, Tesi T, et al. Organic carbon remobilized from thawing permafrost is resequenced by reactive iron on the Eurasian Arctic Shelf[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(19): 8122-8130.
- [17] Zhao Q, Poulson S R, Obrist D, et al. Iron-bound organic carbon in forest soils: Quantification and characterization[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(16): 4777-4788.
- [18] Huang X, Feng C, Zhao G, et al. Carbon sequestration potential promoted by oxalate extractable iron oxides through organic fertilization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1359-1370.
- [19] Drosos M, Piccolo A. The molecular dynamics of soil humus as a function of tillage[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29: 1792-1805.
- [20] Aran D, Gury M, Jeanroy E. Organo-metallic complexes in an Andosol: A comparative study with a Cambisol and Podzol[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 65-79.
- [21] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 263-273. ZHOU Ping, SONG Guo-han, PAN Gen-xing, et al. SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 263-273.
- [22] 杨元智, 李建华, 廖丽君, 等. 重庆市耕地质量等别变化及空间分布特征[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 285-291. YANG Yuan-zhi, LI Jian-hua, LIAO Li-jun, et al. Study on variation and spatial distribution characteristics of arable land quality in Chongqing City [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(12): 285-291.
- [23] 邹於娟. 重庆市耕地利用概况及建议[J]. 南方农业, 2019, 13(16): 28-33. ZOU Yu-juan. General situation and suggestions on cultivated land use in Chongqing[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(16): 28-33.
- [24] 王明宇, 于洪雨, 武海英. 基于 DEM 成果探讨耕地坡度分级数据的生产方式[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(12): 234-238. WANG Ming-yu, YU Hong-yu, WU Hai-ying. Discussing the production mode of grading data of cultivated land slope based on DEM results[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(12): 234-238.
- [25] Rachel C P, Caitlin C E H, Karis J M, et al. Association with pedogen-

- ic iron and aluminum: Effects on soil organic carbon storage and stability in four temperate forest soils[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 133: 333–345.
- [26] Bai X, Fernandez I J. Comparing publicly available databases to evaluate soil organic carbon in Maine, USA[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84: 1722–1736.
- [27] Chasse A W, Ohno T, Higgins S R, et al. Chemical force spectroscopy evidence supporting the layer-by-layer model of organic matter binding to iron(oxy)hydroxide mineral surfaces[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9733–9741.
- [28] Oren A, Chefetz B. Sorptive and desorptive fractionation of dissolved organic matter by mineral soil matrices[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(2): 526–533.
- [29] Saidy A R, Smernik R J, Baldock J A, et al. The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide[J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 15–21.
- [30] Mayes M A, Heal K R, Brandt C C, et al. Relation between soil order and sorption of dissolved organic carbon in temperate subsoils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 1027–1037.
- [31] 许炼烽, 徐谔为, 李志安. 森林土壤固碳机理研究进展[J]. 生态环境学报, 2013(6): 1063–1067. XU Lian-feng, XU An-wei, LI Zhi-an. Research progresses in mechanisms of soil carbon sequestration in plantations in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013(6): 1063–1067.
- [32] Moore T R, Turunen J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 170–177.
- [33] Wen J S, Josep G C, Li J Y, et al. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3325–3335.
- [34] Rowley M C, Grand, Stéphanie, et al. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 137: 27–49.
- [35] Sowers T D, Stuckey J W, Sparks D L. The synergistic effect of calcium on organic carbon sequestration to ferrihydrite[J]. *Geochemical Transactions*, 2018, 19(1): 4.
- [36] Setia R, Rengasamy P, Marschner P. Effect of exchangeable cation concentration on sorption and desorption of dissolved organic carbon in saline soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(1): 226–232.
- [37] 赵彬, 姚鹏, 于志刚. 有机碳-氧化铁结合对海洋环境中沉积有机碳保存的影响[J]. 地球科学进展, 2016, 31(11): 1151–1158. ZHAO Bin, YAO Peng, YU Zhi-gang. The effect of organic carbon-iron oxide association on the preservation of sedimentary organic carbon in marine environments[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(11): 1151–1158.
- [38] 王璐莹. 三江-松嫩平原典型退化湿地土壤铁碳关系研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 5–7. WANG Lu-ying. Study on the relationships between soil iron and carbon of the typical degraded wetlands in Sanjiang-Songnen Plain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 5–7.
- [39] 王萍. 稻田土壤有机碳积累、稳定及其生态功能变化: 滩涂围垦稻田植稻时间序列案例研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 15–20. WANG Ping. Accumulation, stabilization and ecosystem functioning of soil organic carbon in rice paddy soils: A cases study of tidal marsh shifted rice soils in a chronosequence of rice cultivation length[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014: 15–20.
- [40] Begum K, Kuhnert M, Yeluripati J, et al. Soil organic carbon sequestration and mitigation potential in a rice cropland in Bangladesh: A modelling approach[J]. *Field Crops Research*, 2018, 226: 16–27.
- [41] Bai X J, Guo Z H, Huang Y M, et al. Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process[J]. *Catena*, 2020, 191: 104575.
- [42] 张需琴. 水力侵蚀对红壤丘陵区土壤有机碳分子组成及稳定性的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 20–35. ZHANG Xu-qin. Effects of water erosion on soil organic carbon molecular composition and stability in Hilly Red Soil Region[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019: 20–35.