

DOI: 10.11766/trxb201905130190

殷丹, 李欢, 徐江兵, 樊剑波, 王艳玲. 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1259–1269.
YIN Dan, LI Huan, XU Jiangbing, FAN Jianbo, WANG Yanling. Composition Characteristics of Organic Carbon Pool in Upland Red Soil under Long-term Application of Straw and Pig Manure [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1259–1269.

长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征*

殷丹¹, 李欢¹, 徐江兵¹, 樊剑波², 王艳玲^{1†}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 以长期(1988—2014年)配施有机肥小区的对照(CK)、CK+花生秸秆(PS)、CK+稻秆(RS)及CK+猪粪(PM)的红壤旱地土壤为材料, 采用 Zimmermann 等建立的方法将土壤有机碳逐级筛分为颗粒有机碳(POC)、砂粒和稳定团聚体碳(SAOC)、溶解性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(LOC)以及惰性有机碳(rSOC)组分, 并基于洛桑模型(RothC)将上述碳组分进一步划分为易分解植物残体碳(DPM)、难分解植物残体碳(RPM)、微生物生物量碳(BIO)、腐殖质碳(HUM)以及惰性有机碳(IOM)五个碳库, 分析了长期配施作物秸秆与猪粪对各组分有机碳的影响, 探讨了外源碳投入量及铁铝氧化物与各组分碳的相关关系。结果表明: 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地中各组分有机碳含量和分布比例大小依次为: SAOC > rSOC > LOC > POC > DOC, 而 RothC 模型各碳库含量和比例大小依次为: HUM > IOM > RPM > BIO > DPM。长期配施作物秸秆与猪粪的红壤旱地中 HUM、BIO 与 IOM 碳库组分的含量与比例均无显著变化, 已处于相对稳定的平衡状态。与 CK 处理相比, PM 处理可显著增加红壤旱地 SOC; PS 和 RS 处理可显著提高红壤旱地中 DPM 和 RPM 的含量, 且 RS 处理有助于 DPM 与 RPM 中的有机碳向 BIO 与 HUM 转换。相关分析表明, 外源碳投入量及土壤中非晶质氧化铝数量的增加有助于红壤旱地中稳定态有机碳的累积。

关键词: 有机无机配施; 红壤旱地; 有机碳库; 洛桑(RothC)模型; 物理-化学联合分组法

中图分类号: S147.2; S153.6 **文献标志码:** A

Composition Characteristics of Organic Carbon Pool in Upland Red Soil under Long-term Application of Straw and Pig Manure

YIN Dan¹, LI Huan¹, XU Jiangbing¹, FAN Jianbo², WANG Yanling^{1†}

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed(i)to investigate processes and mechanisms of long-term application of crop straw and pig manure affecting content and fractionation of organic carbon pools in upland red soil; (ii)to analyze effect and adaptability of the RothC model simulating changes in organic carbon in upland red soil; and (iii) to provide reference data for management of organic carbon and sustainable development of agriculture in upland red soil. 【Method】 Soil samples were collected from the

* 国家自然科学基金项目(41571130053, 41571286)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571130053 and 41571286)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ylwang@nuist.edu.cn

作者简介: 殷丹(1995—), 女, 陕西咸阳市人, 硕士, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 512879395@qq.com

收稿日期: 2019-05-13; 收到修改稿日期: 2019-07-01; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-08-20

topsoil layer (0~20 cm) of a upland of red soil, where out laid were the four treatments, that is, CK (chemical fertilizer), PS (peanut straw), RS(rice straw) and PM (pig manure), in the National Agro-Ecosystem Observation and Research Station in Yingtan, Jiangxi Province of China. Organic carbon in the soil samples was extracted and sorted into five fractions, i.e. particulate organic carbon (POC), organic carbon in sand and stable aggregates (SAOC), dissolved organic carbon (DOC), labile organic carbon (LOC), and inert organic carbon (rSOC), with the modified Zimmermanns' method. Based on the RothC model, the above-listed fractions of soil carbon were further sorted separately into five subfractions, i.e. organic carbon in readily-decomposable plant residue (DPM), organic carbon in hardly-decomposable plant residue (RPM), microbial biomass carbon (BIO), organic carbon in humus (HUM)and inert organic carbon (IOM). Content and proportion of each fraction and subfraction was determined for analysis of effects of the long-term fertilization relative to treatment. And relationships of each carbon fraction or subfraction with soil iron-aluminum oxides and input of extraneous carbon were analyzed and discussed.

【Result】 Results show that in terms of content and proportion, the fractions of organic carbon in the upland red soil exhibited an order of SAOC > rSOC > LOC > POC > DOC and HUM > IOM > RPM > BIO > DPM. Compared with CK, Treatment PM was 17.0% , 86.7% and 86.7% higher in SOC, DPM and RPM, respectively, and Treatment PS was 94.4% higher in both DPM and RPM. However, the three fertilized treatments did not have much impact on content and proportion of the fractions of BIO, HUM and IOM. The correlation analysis shows that the fraction of rSOC(IOM)was negatively related to free aluminum oxides in the soil, but positively with amorphous - iron oxides in content; that POC was ultra-significantly and positively related to DPM and RPM; that SAOC was significantly and positively related to BIO and HUM; and that rSOC (IOM) was ultra-significantly and negatively related to LOC. **【Conclusion】**Long-term fertilization significantly increases soil organic carbon in red soil upland, but the effect varies with fertilization practice. However, the increasing trend levels off after 26 years of fertilization, thus, in the RothC model, the effects of amendment of organic manure to chemical fertilization on BIO, HUM and IOM appear to be quite insignificant. In the soils applied with PS, RS or PM, organic carbon is dominated with SAOC (63~2 000 μm) and rSOC (0.45 μm ~63 μm)in HUM and IOM. Long-term chemical fertilization amended with PS or PM brings a large volume of carbon into the soil and significantly increases the proportions of DPM and PRM, while amendment of RS can significantly promote transformation of organic carbon from DPM and PRM into BIO and HUM, thus improving soil quality of the farmlands. Long-term fertilization high in organic carbon input and high soil free - aluminum oxides content both accelerate sequestration of inert organic carbon by soil microorganisms.

Key words: Combined application of organic manure and inorganic fertilizer; Upland red soil; Soil organic carbon pool; RothC model; Physical-chemical combined grouping

明确土壤有机碳库 (Soil organic carbon pool, SOCP) 的组成特征是认知与理解土壤碳循环过程的重要基础, 为此, 化学分组法、物理分组法及物理-化学联合分组法先后被用于 SOCP 的分离与提取。化学分组法主要是依据 SOCP 组分的溶解性与氧化性, 采用不同浸提剂对 SOCP 逐级提取, 如采用 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KMnO}_4$ 对土壤进行氧化后, 可将 SOCP 分为易氧化有机碳和稳定有机碳^[1-2]; 物理分组方法主要是结合土壤颗粒的大小对 SOCP 进行分级, 如 Tiessen 和 Stewart^[3]将 SOCP 筛分为砂粒 (53~2 000 μm)、粗粉粒 (5~53 μm)、细粉粒 (2~5 μm)、粗黏粒 (0.2~2 μm) 和细黏粒 (< 0.2 μm) 等颗粒结合态碳; 物理-化学联合分组法则是将化学方法与

物理方法有机结合起来, 将团聚体筛分、密度分组和酸解方法结合, 将 SOCP 依次分离为游离活性有机碳库、物理保护有机碳库、化学保护有机碳库和生物化学保护有机碳库^[4]。

为了更好地表征与预测 SOCP 对气候变化、土地利用方式转换及农业生产管理的响应, 世纪模型 (Century)、洛桑模型 (Rothamsted Carbon Model, RothC)、脱氮-分解作用模型 (DNDC) 和碳氮动态模型 (CANDY) 等 SOCP 的周转模型相应地被提出与建立; 其中, RothC 模型不仅可以动态模拟农业生产管理和植物投入量对有机碳的影响, 也可以推算出 SOCP 达到平衡状态前, 可继续向该田块投放的植物或有机碳量, 而且模型所需的参数简单且容

易获取^[5-8]。基于物理化学联合分组法并借助于 RothC 模型可以将 SOCP 进一步划分为：易分解的植物残体碳（Decomposable plant material, DPM）、难分解的植物残体碳（Resistant plant material, RPM）、微生物生物量碳（Microbial biomass, BIO）、腐殖质碳（Humified organic matter, HUM）以及惰性有机碳（Inert organic matter, IOM）^[5]。王金洲^[9]使用 RothC-26.3 模型模拟了长期施肥条件下典型黑土、潮土和红壤旱地有机碳的动态演变特征，拟合结果较好。可见，建立与明确土壤中可测量碳组分与 RothC 模型中概念碳库的相关关系，是运用 RothC 模型准确模拟与预测 SOCP 变化的关键因子^[10]。

因此，本文以长期配施花生秸秆（PS）、稻秆（RS）及猪粪（PM）的红壤旱地土壤为研究材料，采用物理-化学联合分组法，将 SOCP 依次筛分为粒级 63~2 000 μm 的粗颗粒有机碳（CPOC）、溶解性有机碳（DOC）及粒级为 0.45~63 μm 的细颗粒有机碳（SCOC），并采用密度分组法将粗颗粒有机碳区分为重组有机碳（SAOC）与轻组有机碳（POC），采用氧化法将细颗粒有机碳（SCOC）区分为惰性有机碳（rSOC）及易氧化有机碳（LOC）；再结合 RothC 模型中将上述组分有机碳进一步划分为 DPM、RPM、BIO、HUM 及 IOM，并将物理化学分组获得的有机碳组分与 RothC 模型的碳库进行关联，探讨长期配施作物秸秆与猪粪对红壤旱地有机碳库组分的影响过程与机制，分析 RothC 模型对红壤旱地有机碳库变化的模拟效果与适应性，研究结果可为红壤旱地有机碳库管理及农业的可持续发展提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 长期试验地概况

长期肥料定位试验于 1988 年建于江西省鹰潭农田生态系统国家野外研究站内（28°04'N~28°37'N，116°41'E~117°09'E）。该地属中亚热带季风气候，年平均温度大于 17.8 $^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 1 758 mm，大于 10 $^{\circ}\text{C}$ 积温为 5 528 $^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 262 d。供试土壤为第四纪红黏土发育的典型红壤。该试验小区共设置了 CK（1/2NPK）、1/2NPK + 花生秸秆（PS）、1/2NPK + 稻秆（RS）和 1/2NPK + 猪粪（PM）

四个肥料处理。试验小区面积为 33 m^2 ，每个处理重复 3 次，随机排列。1995 年以前进行花生和油菜轮作，后改为一季花生，冬季休田。1988—2012 年的肥料用量参见文献^[11]，2013 年种植前调整施肥量，将所有处理中的养分均等氮量投入，其中，有机物料占总投入量的 30%（以 N 计算）。

1.2 土壤样品采集与预处理

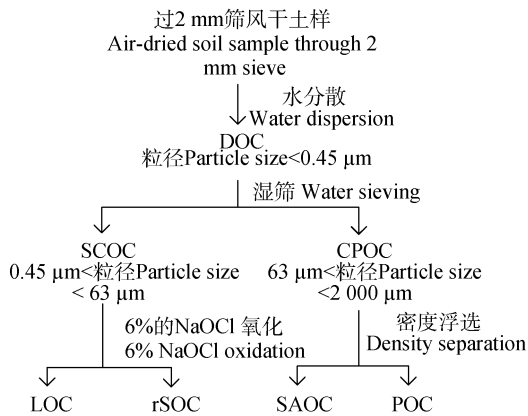
土壤样品于 2014 年在 CK、PS、RS 及 PM 小区内按“S”形采样法采集耕层（0~20 cm）10 点，采用四分法混合均匀后，保留约 1 kg 土样带回室内，将肉眼可见的根系、石砾及动植物残体挑拣出去后，风干、磨细、过 2 mm 筛、保存备用。供试土壤的基本理化性质参见文献^[11]。

1.3 土壤有机碳分组

土壤有机碳分组方法在 Zimmermann 等^[10]的方法上基础上略作修改，具体步骤为：

（1）称取过 2 mm 筛的风干土壤 20 g 于 250 mL 振荡瓶中，加入纯水 200 mL，浸泡分散 24 h 后，在平行式往复振荡机（270 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）上振荡 2 h 后，抽取过滤（0.45 μm ）适量浸提液用总有机碳（TOC）分析仪（TOC-L CPH CN 200，岛津，日本）测定溶解性有机碳（DOC）含量；（2）然后，将土壤悬液倒入团聚体分析仪（XY-100，北京翔宇伟业）中直径为 63 μm 的筛子上，并加水至淹没筛上土壤 3 cm 处，以 20 min^{-1} 上下筛动 30 min 后，将残留在筛子上的土壤颗粒转至已知重量的铝盒中并烘干至恒重，即获得粒径 63~2 000 μm 粗成分颗粒（CPOC）；（3）将土壤筛分液用质量已知的 0.45 μm 滤膜进行抽滤，残留在滤膜上的土壤颗粒烘干后即可得到粒径为 0.45~63 μm 的细成分颗粒（SCOC）；（4）称取 2 g 粒径为 63~2 000 μm 的粗成分于已知重量的 50 mL 塑料离心管中，加入 20 mL 密度为 1.78 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的碘化钠（NaI）溶液，在平行式复振荡机上振荡 30 min，再离心（5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）15 min 后，将含有轻组部分的 NaI 溶液过滤，并反复冲洗滤纸，残留在滤纸上的残渣即为轻组组分（POC）；离心管内残留的土壤样品反复冲洗 2~3 次后，烘干即获得重组组分（SAOC）；（5）称取粒径为 0.45~63 μm 的细成分 0.50 g 于 50 mL 塑料离心管中，加入 25 mL 浓度为 60 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的次氯酸钠溶液（NaClO，pH = 8.0），在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下氧化 18 h，振荡 10 min（270 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ）后、离心 15 min（5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ），倒掉上清液；再

重复一遍上述氧化过程所得土壤残渣即为惰性有机碳组分 (rSOC)。具体操作流程见图 1。



注: DOC, 溶解性有机碳; SCOC, 细颗粒有机碳; LOC, 易氧化有机碳; rSOC, 惰性有机碳; POC, 轻组(颗粒态)有机碳; SAOC, 重组有机碳; CPOC, 粗颗粒有机碳。下同。Note: DOC, dissolved organic carbon; SCOC, organic carbon in silt and clay; LOC, labile organic carbon; rSOC, resistant soil organic carbon; POC, particulate organic carbon; SAOC, organic carbon in sand and stable aggregates; CPOC, organic carbon in coarse particle. The same below.

图 1 基于 Zimmermann 等^[10]方法修改后的土壤有机碳的分组流程图

Fig. 1 Flow chart of the soil organic carbon fractionation procedure derived from the Zimmermann's method through modification

结合 RothC 模型将上述物理化学分组获得的各组分 SOC 进一步划分为 DPM、RPM、BIO、HUM 及 IOM, 划分流程如图 2 所示。

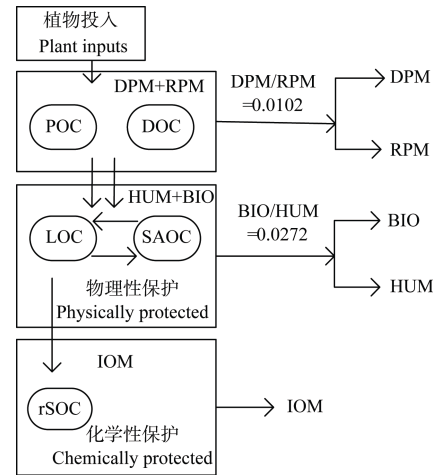
分组获得的各级有机碳采用碳氮 (CN) 元素分析仪 (Vario EL cube, Elementar, 德国) 测定。

1.4 铁铝氧化物的测定

游离态氧化铁 ($f\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、氧化铝 ($f\text{-Al}_2\text{O}_3$) 采用 DCB (连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸氢钠) 法提取, 非晶质氧化铁 ($a\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、氧化铝 ($a\text{-Al}_2\text{O}_3$) 采用 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 草酸铵缓冲液 ($\text{pH} = 3.17$) 提取^[12], 上述提取液中的铁铝浓度均采用电感耦合等离子光谱发生仪 (ICP-OES Optima800, PerkinElmer, 美国) 测定。

1.5 数据处理

各组分有机碳含量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 以 C 计, 下同) = [该组分有机碳含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) \times 土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) \times 土层深度 (20 cm)]/10。



注: DPM, 易分解的植物残体碳; RPM, 难分解的植物残体碳; BIO, 微生物生物量碳; HUM, 腐殖质碳; IOM, 惰性有机碳。下同。Note: DPM, decomposable plant material; RPM, resistant plant material; BIO, microbial biomass; HUM, humified organic matter; IOM, inert organic matter. The same below.

图 2 土壤有机碳组分与 RothC 模型碳库间的关系图^[10]
Fig. 2 Relationships between soil organic carbon fraction and the carbon pools of the RothC model

数据统计分析采用 IBM SPSS Statistics 20 软件, 绘图采用 Visio 2007 和 Origin 2018 软件。显著性检验采用邓肯氏新复极差法 (SSR)。

2 结果

2.1 长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地有机碳总量的影响

与试验前 (1988 年) 相比, 长期平衡施肥的 CK 处理及 PS、RS 及 PM 处理的红壤旱地 SOC 依次显著增加了 1.43 倍、1.50 倍、1.59 倍及 1.84 倍, 但各处理的 SOC 总增量及年增量无显著差异 (表 1)。与 CK 处理相比, PM 处理使红壤旱地 SOC 显著提高了 1.2 倍, 而 PS 和 RS 处理影响不显著 (表 1)。

2.2 长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地有机碳组分的影响

长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地中 $63 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 粗颗粒有机碳 (CPOC) 含量为 $7.4 \sim 8.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 约占 SOC 的 45.4%~50.0%; 但与 CK 处理相比, PS、RS、PM 处理对红壤旱地中 CPOC 影响不显著 (表 2)。由表 2 可以看出, 将 CPOC 组分进行密度分组后, SAOC 重组组分有机碳含量为

表 1 长期施肥下土壤中总有机碳含量的变化

Table 1 Variation of total soil organic carbon content relative to treatment of the long-term fertilization experiment/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

年份	处理	含量	增量	年增量
Year	Treatment	Content	Increment	Annual increment
1988	试验前土壤	3.7c	—	—
	Before-experiment			
2014	CK	9.0b	5.3a	0.2a
	PS	9.3ab	5.6a	0.2a
	RS	9.6ab	5.9a	0.2a
	PM	10.5a	6.8a	0.3a

注：CK、PS、RS、PM 分别表示对照、配施花生秸秆、配施稻秆及配施猪粪处理。同列相同字母表示不同施肥处理间统一理化性质间无显著差异 ($P > 0.05$)。下同。Note: CK, PS, RS and PM represent chemical fertilizer, peanut straw, rice straw and pig manure. Mean values affixed with the same letters are insignificantly different at $P > 0.05$ in soils the same in soil physical and chemical property relative to between fertilization treatments. The same below.

表 2 长期配施有机肥对红壤旱地各有机碳组分的影响

Table 2 Effect of long-term fertilization on fractionation of soil organic carbon in the upland red soil relative to treatment

处理	DOC	含量 Contents/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)					
		63~2 000 μm			0.45~63 μm		
		SAOC	POC	CPOC	LOC	rSOC	SCOC
CK	0.3Ca	6.6ABa	0.6Cb	7.4ABa	2.0Ca	6.3Bab	8.2Aa
PS	0.3Ea	7.0Ba	1.4Da	8.1Aa	2.0Da	6.1Cab	8.1Aa
RS	0.3Ea	7.1Ba	1.0Eab	8.1Aa	2.2Da	5.6Cb	7.8ABa
PM	0.4Da	7.2Ba	1.3Ca	8.5Aa	1.4Ca	7.1Ba	8.5Aa

处理	DOC	占比 Proportion/%					
		63~2 000 μm			0.45~63 μm		
		SAOC	POC	CPOC	LOC	rSOC	SCOC
CK	1.9Da	41.6Ba	3.8CDa	45.4ABa	13.1Ca	39.6Bab	52.7Aa
PS	2.0Ea	41.7Ba	8.4Ea	50.0Aa	11.6Da	36.4Cab	48.0Aa
RS	1.9Fa	43.8Ba	6.1Ea	49.9Aa	13.7Da	34.5Cb	48.2Aa
PM	2.0Da	41.3Ba	7.5Ca	48.9Aa	8.4Ca	40.7Ba	49.1Aa

注：同列相同小写字母表示不同施肥类型间同一碳组分有机碳无显著差异 ($P > 0.05$)；同行相同大写字母表示同一施肥类型下不同碳组分有机碳无显著差异 ($P > 0.05$)。下同。Note: Mean values with the same lowercase uppercase letters are insignificantly different at $P > 0.05$ in content of organic carbon of the same fraction between treatments; Mean values with the same uppercase letters are insignificantly different at $P > 0.05$ between fractions of organic carbon in the same soil. The same below.

6.6~7.2 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，约占 SOC 的 41.3%~43.8%，显著大于 POC 轻组组分含量占比 (3.8%~8.4%)，说明红壤旱地 CPOC 主要以与砂粒结合或包裹于稳定团聚体内的形式存储于土壤之中；但长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地 SAOC 和 POC 组分有机碳含量影响

不显著 (表 2)。

DOC 含量为 0.3~0.4 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，约占 SOC 的 1.9%~2.0% (表 2)。与 CK 处理相比，PS、RS 和 PM 处理对红壤旱地 DOC 含量无显著影响 (表 2)。而 0.45~63 μm 细颗粒有机碳 (SCOC) 含量为 7.8~

8.5 t·hm⁻², 约占 SOC 的 48.0%~52.7%; 但与 CK 处理相比, PS、RS 和 PM 处理对红壤旱地 SCOC 影响不显著 (表 2)。按有机碳能否被 6%NaClO 氧化, 可将红壤旱地中 SCOC 组分区分为 rSOC(残渣态有机碳)和 LOC(易氧化有机碳); 其中, rSOC 含量为 5.6~7.1 t·hm⁻², 约占 SOC 的 34.5%~40.7%, 显著高于 LOC 的占比 (8.4%~13.7%)。与 CK 处理相比, PS、RS 及 PM 处理对 rSOC 和 LOC 含量无显著影响 (表 2)。

2.3 长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地 RothC 模型碳库组成的影响

长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地中难分解的植物残体碳 (RPM) 含量为 0.9~1.7 t·hm⁻², 约占 SOC 的

5.6%~10.6%, 易分解的植物残体碳 (DPM) 含量占 SOC 的比例仅为 0.1% (表 3)。与 CK 处理相比, PS 和 PM 处理红壤旱地中 DPM 与 RPM 含量分别显著增加了 94.4%和 86.7%, 而 RS 处理无显著影响 (表 3)。

红壤旱地中腐殖质碳 (HUM) 含量为 8.4~9.1 t·hm⁻², 约占 SOC 的 48.4%~56.0%, 微生物生物量碳 (BIO) 所占比例仅为 1.3%~1.5% (表 3)。与 CK 处理相比, RS 处理红壤旱地中 BIO 与 HUM 占 SOC 的比例均显著增加了 5.0%, 而 PS 和 PM 处理则无显著影响 (表 3)。

惰性有机碳 (IOM) 含量为 5.6~7.0 t·hm⁻², 约占 SOC 的 34.5%~40.7%; 与 CK 处理相比, PM、PS 和 RS 处理对 IOM 均无显著影响 (表 3)。

表 3 长期配施有机肥对红壤旱地 RothC 模型碳库组分的影响

Table 3 Effects of long-term application of organic manure on carbon pool fractionation by the RothC model in the upland red soil

处理	含量 Contents/ (t·hm ⁻²)				
Treatments	DPM	RPM	BIO	HUM	IOM
CK	0.0Cb	0.9Cb	0.2Ca	8.4Aa	6.3Bab
PS	0.0Da	1.7Ca	0.2Da	8.4Aa	6.1Bab
RS	0.0Db	1.3Cab	0.2Da	9.1Aa	5.6Bb
PM	0.0Da	1.7Ca	0.2Da	8.4Aa	7.0Ba
处理	占总有机碳的百分比 Proportion of SOC/%				
Treatments	DPM	RPM	BIO	HUM	IOM
CK	0.1Db	5.6Cb	1.4Dab	53.3Aab	39.6Bab
PS	0.1Da	10.6Ca	1.4Dab	51.7Aab	36.4Bab
RS	0.1Db	8.0Cab	1.5Da	56.0Aa	34.5Bb
PM	0.1Da	9.5Ca	1.3Db	48.4Ab	40.7Ba

2.4 土壤有机碳组分与铁铝氧化物及有机碳累积投入量间的相关性

相关分析表明, 随着 $f\text{-Al}_2\text{O}_3$ 数量的增加, 红壤旱地中 LOC 数量显著增加 ($P < 0.05$), rSOC (IOM) 数量则显著降低 ($P < 0.05$), 而 $f\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 则无显著变化; 随着 $a\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 数量的增加, 红壤旱地中 rSOC (IOM) 数量则显著增加 ($P < 0.05$); 随着 $a\text{-Al}_2\text{O}_3$ 数量的增加, 红壤旱地中各 POC 数量则显著减少 ($r = -0.60$, $P < 0.05$), 而 $f\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的数量变化对红壤旱地

各组分碳均无显著影响 (表 4)。随着外源有机碳累积投入量的增加, 红壤旱地中 rSOC (IOM) 积累量增加显著 ($P < 0.05$) (表 4)。长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地中 DPM、RPM 与 POC 均呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 但与 DOC 间却无显著相关关系; BIO 与 HUM 及 SAOC 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 但与 LOC 间无显著相关关系; 而 LOC 与 rSOC (IOM) 呈极显著负相关关系 ($r = -0.82$, $P < 0.01$) (表 4)。

表 4 土壤有机碳组分与铁铝氧化物及有机碳累积投入量间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of soil carbon fractions with Fe-Al oxides and total organic carbon input during the year from 1988 to 2014

	POC	SAOC	DOC	LOC	rSOC	DPM	RPM	BIO	HUM	IOM
<i>f</i> -Fe ₂ O ₃	-0.37	-0.35	-0.41	0.28	-0.55	-0.37	-0.41	-0.17	-0.13	-0.55
<i>f</i> -Al ₂ O ₃	-0.14	-0.28	-0.07	0.63*	-0.68*	-0.25	-0.14	0.21	0.24	-0.68*
<i>a</i> -Fe ₂ O ₃	-0.13	0.18	-0.06	-0.40	0.60*	-0.04	-0.13	-0.06	-0.08	0.60*
<i>a</i> -Al ₂ O ₃	-0.60*	-0.29	0.30	0.12	0.25	-0.49	-0.57	-0.15	-0.14	0.25
TSOC	0.46	0.19	0.39	-0.41	0.58*	0.39	0.5	-0.09	-0.15	0.58*
POC	1	0.23	0.05	-0.33	0.24	0.86**	0.99**	-0.12	-0.15	0.24
SAOC		1	0.27	-0.43	0.37	0.19	0.24	0.64*	0.61*	0.37
DOC			1	0.28	0.08	0.25	0.15	0.45	0.47	0.08
LOC				1	-0.82**	-0.21	-0.29	-0.28	0.38	-0.82**
rSOC					1	0.23	0.24	-0.23	-0.26	1.0**
DPM						1	0.88**	-0.17	-0.15	0.23
RPM							1	-0.07	-0.10	0.24
BIO								1	0.99**	-0.23
HUM									1	-0.28
IOM										1

注：*在 0.05 水平显著；**在 0.01 水平显著；TSOC 为 1988—2014 年各小区累积投入有机碳总量；*f*-Fe₂O₃、*f*-Al₂O₃ 为游离态氧化铁、氧化铝；*a*-Fe₂O₃、*a*-Al₂O₃ 为非晶质氧化铁、氧化铝。Note：* significant at 0.05 level；** significant at 0.01 level；TSOC stands for total amount of organic carbon input from 1988 to 2014 in each plot；*f*-Fe₂O₃ for free - iron oxides；*f*-Al₂O₃ for free - aluminum oxides；*a*-Fe₂O₃ for free - iron oxides；and *a*-Al₂O₃ for amorphous - aluminum oxides.

3 讨 论

3.1 长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地有机碳库组分含量的影响

施肥是影响土壤有机碳库组分及其稳定性的主要农业管理措施之一，外源有机肥施用的种类与数量是影响土壤有机碳组分的重要方面。本研究发现，与 CK 处理相比，只有长期配施猪粪处理使红壤旱地 SOC 显著提高了 1.2 倍，而 PS 和 RS 处理影响不显著（表 1）；这可能是由于有机无机肥配施显著提高土壤酶及微生物的活性^[13]，其中，猪粪对土壤脲酶活性的增加作用优于作物秸秆，而脲酶活性与有机碳含量和微生物生物量呈正相关关系（ $P < 0.05$ ）^[14]。PS 处理红壤旱地中 DPM 与 RPM 均显著增加了 94.4%，PM 处理下 DPM 与 RPM 则均显著增加了 86.7%，而 RS 处理无显著影响（表 3）；与猪粪相比，秸秆含氮量低、C/N 大，且以稻秆更显著，因此，长期配施稻秆后，土壤中缺乏足量可供

给的氮而限制了微生物的活性，进而阻碍有机质的分解，减弱施加作物秸秆对有机碳含量的增加作用^[15]。本研究发现，DPM 与 RPM 在不同施肥处理间的变异系数最大可达 29.4%（表 3），受长期配施秸秆与猪粪的影响较为显著，可以作为有效反映 SOC 变化的指标^[16]。长期配施花生秸秆、稻秆及猪粪对红壤旱地中 BIO、HUM 及 IOM 均无显著影响（表 3），这可能是随着花生秸秆、稻秆及猪粪的施肥年限及施肥量的增大使得红壤旱地逐渐接近或者已经达到其固碳的饱和容量^[17]，而导致土壤有机碳无显著差异（表 3）。有研究^[18]表明长期施肥的红壤有机碳含量呈现出先迅速增加后逐渐趋于平缓的趋势；也有研究^[19]表明，单施无机肥的土壤有机碳仍处于缓慢增加的趋势，而长期连续配施有机肥的红壤有机碳含量呈现先迅速上升，后缓慢下降的趋势，可见，若无耕作管理方式的显著改变，土壤有机碳将一直处于现阶段较稳定的平衡状态。余喜初等^[19]的研究表明，长期配施有机肥的红壤稻田中有

机碳含量呈现先迅速上升,后缓慢下降的趋势,且在连续配施有机肥 20 年时即可达到基本稳定。与本文中长期配施秸秆与猪粪 26 年后,红壤旱地中 BIO、HUM 及 IOM 在三个肥料处理中的变异系数分别不超过 8.9%、9.6%和 9.6%的结果相符(表 3)。

3.2 长期配施秸秆与猪粪对红壤旱地有机碳分布特征的影响

长期施肥可影响土壤中有机碳组分的分布特征,而有机碳组分的分布特征又可反映土壤结构和功能的变化。长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地中 CPOC 和 LOC 显著大于 DOC,其中,又以 SAOC 和 rSOC 为主要组分,二者占 SOC 的百分比之和可达 78.1%及以上,而 LOC、POC 与 DOC 组分含量相对较少(表 2);RothC 模型中 HUM 及 IOM 分别占 SOC 的 48.4%~56.0%和 34.5%~40.7%,而 DPM 与 RPM 仅占 SOC 的 5.7%~10.8%,由此可见,红壤旱地中的有机碳主要以砂粒和稳定的团聚体碳和惰性碳组分的形式储存于 HUM 和 IOM 碳库中(图 3)。SAOC 组分有机碳与砂粒结合或存储于团聚体中而受物理性保护,而 rSOC 具有抗氧化的化学特性,均可在很大程度上降低 SAOC 和 rSOC 的分解速率,故大部分的有机碳均保存于 IOM 和 HUM 碳库中^[20];DPM 与 RPM 则是土壤中活性碳库的主要成分,具有抗氧化程度低、水溶性强、分解迅速和周转速率高等特性,促进了 DPM 与 RPM 的转化,因此在总有机碳含量中的占比较低^[21]。有研究^[22-23]表明,施肥可为土壤提供直接的有机碳源,而秸秆中含有更多易被微生物分解的糖类、淀粉等物质,纤维素、木质素等不易分解的物质较少,促进有机碳及养分的分解和转化。与 CK 处理相比,PS 和 PM 处理红壤旱地中 DPM 与 RPM 占 SOC 的百分比分别显著增加了 88.7%和 68.1%,RS 处理无显著影响;但 RS 处理使红壤旱地中 BIO 与 HUM 占 SOC 的百分比均显著增加了 5.0%,而 PS 和 PM 处理则无显著影响(表 3)。由此可见,不同施肥类型对红壤有机碳分布特征的影响存在差异,其中,长期配施花生秸秆和猪粪可向土壤直接输送大量外源碳,显著提高土壤中 DPM 与 RPM 的占比,而秸秆则可显著促进 DPM 与 RPM 中的有机碳向 BIO 与 HUM 中受物理性保护的有机碳转换,且长期施用秸秆可提高农业土壤质量^[24]。长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地

中 DPM 及 RPM 与 POC 数量均呈极显著正相关关系,而与 DOC 数量无显著关系;BIO 及 HUM 与 SAOC 数量呈显著正相关关系,而与 LOC 数量无显著关系(表 4);这均是由于与 POC 和 SAOC 相比,DOC 和 LOC 含量过少造成的,因此不受保护的 DPM 与 RPM 主要受 POC 的影响,而受物理性保护的 BIO 与 HUM 主要受 SAOC 组分碳的影响。随着外源有机碳累积投入量的增加,旱地红壤中的 rSOC (IOM) 呈显著增加趋势(表 4),这表明外源有机质更容易通过微生物固定为较为稳定的有机碳,在农业生产中也可建议农民施用高碳投入量的有机肥以达到固碳减排的目的^[25]。

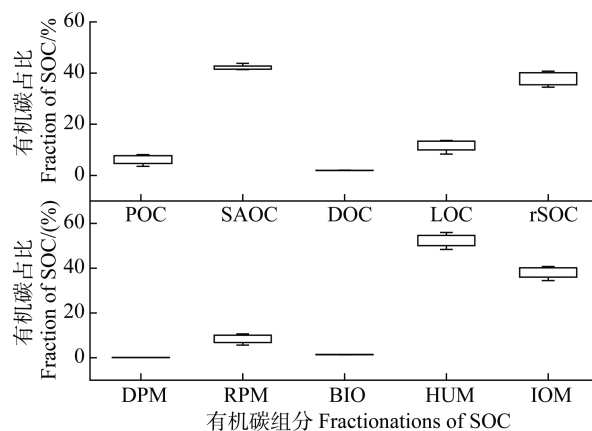


图 3 长期配施有机肥下红壤旱地有机碳分布比例

Fig. 3 Effects of long-term application of organic fertilizer on fractionation of SOC in the upland red soil

3.3 铁铝氧化物对红壤旱地有机碳组分含量的影响

铁铝氧化物作为土壤中与有机碳结合的重要矿物质胶结物质,对土壤结构和稳定性有显著影响,尤其是在红壤等酸性土壤中,有机碳与无机矿物(铁铝氧化物等)之间的吸附作用对维持有机碳的稳定、抵抗微生物分解有重要的调控作用^[26-27]。本研究发现, $f\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 LOC 含量呈显著正相关关系,而与 rSOC (IOM) 呈显著负相关关系; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 与 rSOC (IOM) 呈显著正相关关系(表 4)。夏昕^[28]的研究结果也证实红壤旱地中非晶质铁铝氧化物与稳定性有机碳呈极显著正相关关系,而游离态铁铝氧化物与稳定性有机碳呈显著负相关关系。这是由于铁铝氧化物与稳定表面的吸附作用促进了 SOC 的稳定性,因此,铁铝氧化物的分布规律基本与稳定性有

机碳的分布一致^[29]。有机肥的施用虽促进了 SOC 的增加，但 SOC 又可抑制铁氧化物的晶质化过程^[30]，且与游离态铁铝氧化物相比，非晶质铁铝氧化物具有更大的表面积和表面活性，尽管含量相对较低，但可通过离子或配位交换与有机碳形成稳定的复合体，具有更强的胶结能力^[26,31]。根据相关研究^[32-33]可知，由于铝离子的离子电荷/半径比大于铁离子，铁的电负性大于铝，故氧化铝的吸附能力可能强于氧化铁，而这与氧化铝在土壤中的形态和电荷密度有关。

3.4 红壤旱地 RothC 模型有机碳库量化的应用

有研究表明，在可耕地中 BIO 和 HUM 的量化值与模拟值间相关性较强，而 DPM、RPM 及 IOM 的量化值与模拟值间相关性较弱，且 DPM 与 RPM 模拟值大于量化值，而 BIO、HUM 及 IOM 的量化值大于模拟值^[10]。这是由于计算 RothC 模型碳库的量化值时，需要根据 DPM/RPM 和 BIO/HUM 的比值来分别计算出 DPM、RPM、BIO、HUM 及 IOM，当比值不同时，计算出的碳库有机碳含量也有一定差异。根据 Zimmermann 等^[10]对瑞士不同地区 123 个土壤样品的分析可知，DPM/RPM 比值不仅会受到土地利用类型、采样时间等的影响，且可耕地土壤中的 DPM/RPM 与年平均温度呈负相关关系。不同作物残体的物料性质差异较大，因此，不同作物残体的 DPM/RPM 比值也不同，如小麦根系、小麦秸秆、玉米根系和玉米秸秆的 DPM/RPM 比值调整为 0.89、3.04、4.35 和 3.25 后，模拟值和实测值间相对误差明显减小^[34]。尽管如此，受模型运行时间的影响，量化值却较模拟值更能准确地反映真实的环境条件，且随着时间的延长，用量化值和模拟值预测的土壤 SOC 变化趋势的差异也逐渐减小^[35]。但为了进一步论证研究所得 RothC 碳库有机碳含量与实际田间的适配性，还需将试验地区的降水、蒸发、温度、表层黏土含量等值为输入参数，使用 RothC 模型正向模拟出各个碳库的理论值，再与本文测量结果进行比较，以期修订更合理的有机碳分组步骤，提升量化 RothC 碳库的准确性，并提高 RothC 模型在红壤区的适用性^[36]。

4 结 论

长期配施猪粪可以显著增加红壤旱地 SOC 及

DPM、RPM 的含量，但土壤中的各有机碳组分及 HUM、BIO 及 IOM 均无显著变化；而且土壤有机碳主要以 SAOC 和 rSOC 的形式储存于 HUM 和 IOM 碳库中。外源碳投入量及土壤非晶质氧化铝数量的增加有助于红壤旱地中稳定态有机碳的累积；施用高碳投入量的有机肥可以达到固碳减排的目的。为了提高 RothC 模型在红壤旱地上的适用性及模拟的准确性，还需结合当地气候条件及农业生产实践状况，通过模型模拟结果调整 DPM/RPM 比值，并完善有机碳（库）的分组方法。

参考文献 (References)

- [1] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46 (7): 1459—1466.
- [2] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156 (1): 399—402.
- [3] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. cultivation effects on organic matter composition in size fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47 (3): 509—514.
- [4] Stewart C E, Plante A F, Paustian K, et al. Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (2): 379—392.
- [5] Coleman K, Jenkinson D S. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil[M]//Evaluation of soil organic matter models. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996: 237—246.
- [6] Franko U, Oelschlägel B, Schenk S. Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY[J]. *Ecological Modelling*, 1995, 81 (1/2/3): 213—222.
- [7] Parton W J, Rasmussen P E. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58 (2): 530—536.
- [8] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97 (D9): 9777—9783.
- [9] Wang J Z. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics and equilibrium point of typical upland soils in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural

- Sciences, 2011.[王金洲. RothC 模型模拟我国典型旱地土壤的有机碳动态及平衡点[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.]
- [10] Zimmermann M, Leifeld J, Schmidt M W I, et al. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (3): 658—667.
- [11] Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1240—1250. [王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1240—1250.]
- [12] Lu R K. *nalytical methods for soil and agro-chemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [13] Yang X D, Zeng X B, Wen J, et al. Effect of application of pig manure on physicochemical properties and enzyme activities of red soil upland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 739—749. [杨小东, 曾希柏, 文炯, 等. 猪粪施用量对红壤旱地理化性质及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (3): 739—749.]
- [14] Li W T, Li Z P, Liu M, et al. Activities of extracellular enzymes and nutrients in red paddy soil response to long term fertilizations[J]. *Soils*, 2016, 48 (4): 686—691. [李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 红壤水稻土累积酶活性及养分对长期不同施肥处理的响应[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 686—691.]
- [15] Huang J X. Effect of Long-term organic and inorganic fertilizer application on soil microbiological characteristics and soil fertility[J]. *Agriculture & Technology*, 2016, 36 (4): 35. [黄金喜. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *农业与技术*, 2016, 36 (4): 35.]
- [16] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 8—16.
- [17] Tong X G, Xu M G, Wang X J, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. *Catena*, 2014, 113: 251—259.
- [18] Huang J, Zhang Y Z, Gao J S, et al. Variation characteristics of soil carbon sequestration under long-term different fertilization in red paddy soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (11): 3373—3380. [黄晶, 张杨珠, 高菊生, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有机碳储量变化特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (11): 3373—3380.]
- [19] Yu X C, Li D M, Liu K L, et al. Evolution and influencing factors of soil organic carbon under long-term fertilization in subtropical paddy field of China[J]. *Soils*, 2013, 45 (4): 655—660. [余喜初, 李大明, 柳开楼, 等. 长期施肥红壤稻田有机碳演变规律及影响因素[J]. *土壤*, 2013, 45 (4): 655—660.]
- [20] Xu J H, Sun Y, Gao L, et al. A review of the factors influencing soil organic carbon stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 222—230. [徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (2): 222—230.]
- [21] Huang S, Peng X X, Huang Q R, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154 (3/4): 364—369.
- [22] Wei M, Zhang A J, Li H M, et al. Effect of different long-term fertilization on soil organic carbon storage in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33 (1): 233—238. [魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 长期不同施肥对潮土有机碳储量的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33 (1): 233—238.]
- [23] Wang J K, Xu Y D, Ding F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 528—540. [汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 528—540.]
- [24] Guan L Z, Jiang X N, Zhang G C, et al. Effects of rice straw-derived biochar on organic carbon activity in coastal saline paddy soil[J]. *Soils*, 2019, 51 (1): 205—209. [关连珠, 姜雪楠, 张广才, 等. 添加稻草生物炭对滨海水稻土有机质活性的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (1): 205—209.]
- [25] Xu Y M. The evolution characteristics and turnover mechanisms of soil organic carbon under long-term fertilization in grey desert soil in Xinjiang Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. [许咏梅. 长期不同施肥下新疆灰漠土有机碳演变特征及转化机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.]
- [26] Xu J L, Zhu Z F, Huang C Q, et al. Interactions between organic matters and clay minerals in soils for different land uses in Jiangnan plain, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2014, 34 (1): 47—52. [徐晋玲, 朱志锋, 黄传琴, 等. 江汉平原不同利用方式下土壤有机质与粘粒矿物的交互作用[J]. *矿物学报*, 2014, 34(1): 47—52.]
- [27] Guo X M, Wu H H, Luo M, et al. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(6): 515—521. [郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26 (6): 515—521.]
- [28] Xia X. Effects of long-term fertilization on organic carbon morphology and microflora in red upland and

- paddy soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. [夏昕. 长期施肥对红壤旱地和水田有机碳形态结构及微生物群落的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.]
- [29] Heng L S, Wang D Z, Jiang X, et al. Relationship between Fe, Al oxides and stable organic carbon, nitrogen in the yellow-brown soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 31 (11): 2748—2755. [衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J]. *环境科学*, 2010, 31 (11): 2748—2755.]
- [30] Pizarro C, Escudéy M, Fabris J D. Influence of organic matter on the iron oxide mineralogy of volcanic soils[J]. *Hyperfine Interactions*, 2003, 148/149(1/2/3/4): 53—59.
- [31] Wang X H, Yang Z J, Liu X F, et al. Effects of different forms of Fe and Al oxides on soil aggregate stability in mid-subtropical mountainous area of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (9): 2588—2596. [王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36 (9): 2588—2596.]
- [32] Wei S Y, Tan W F, Liu F. Advances on the study of mineral-humus interactions in soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009 (1): 1—6. [魏世勇, 谭文峰, 刘凡. 土壤腐殖质-矿物质交互作用的机制及研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2009 (1): 1—6.]
- [33] Zhang Q, Fang H L, Shi Z H, et al. Advances in influence factors of aggregate stability under erosion[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43 (S1): 77—82. [张琪, 方海兰, 史志华, 等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. *林业科学*, 2007, 43(S1): 77—82.]
- [34] Zhao Y W. RothC model simulation of soil organic carbon on farmland crop residue in North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. [赵雅雯. RothC 模型在我国北方农田作物残体提升土壤有机碳中的应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.]
- [35] Xu X L, Liu W, Kiely G. Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140 (3/4): 372—381.
- [36] Poeplau C, Don A, Dondini M, et al. Reproducibility of a soil organic carbon fractionation method to derive RothC carbon pools[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 (6): 735—746.

(责任编辑: 陈荣府)