

中文核心期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址: http://www.aes.org.cn

2009-2019年红壤典型区水稻土有机碳组分库时空变化

王玺洋, 李亮, 李晓晖, 辛在军, 何石福, 孙小艳

引用本文:

王玺洋, 李亮, 李晓晖, 辛在军, 何石福, 孙小艳. 2009—2019年红壤典型区水稻土有机碳组分库时空变化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 589-598.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0745

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1133-1140 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1247

碳酸钙对黄壤有机碳矿化及其温度敏感性的影响

李瑞东, 王小利, 段建军, 罗安焕, 陈领, 陈佳

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 115-122 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0329

香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响

王超, 邱竞驰, 李建华, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清, 胡家帅

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 537-546 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0766

石灰性农田土壤-水稻系统根际与非根际土氮转化速率差异

何晓茜, 刘汐霓, 黄宇潇, 兰婷

农业环境科学学报. 2023, 42(2): 384-392 https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0586

围垦对滨海稻田土壤N2O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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王玺洋, 李亮, 李晓晖, 等. 2009—2019年红壤典型区水稻土有机碳组分库时空变化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 589-598.

WANG X Y, LI L, LI X H, et al. Spatio-temporal variations of soil organic carbon pools of paddy soil in a typical red soil region from 2009 to 2019[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 589–598.

2009—2019年红壤典型区水稻土有机碳组分库时空变化

王玺洋1,2,李亮1,2,李晓晖1,2,辛在军1,2,何石福1,2,孙小艳1,2*

(1.江西省科学院微生物研究所, 江西省环境微生物重点实验室, 南昌 330096; 2.江西省流域生态研究所, 南昌 330096)

摘 要:为及时掌握土壤有机碳组分库的时空变化,本研究基于历史采样信息开展新一轮土壤样品采集,进行100 d 土壤呼吸培养实验,借助三库一级动力学模型,获得土壤活性碳库大小(C_a)、缓效性碳库大小(C_a)、缓效性碳库大小(C_a)和惰性碳库大小(C_a),以揭示2009—2019年江西省东乡地区表层水稻土 C_a 、 C_a 和 C_a 的时空变化及主要影响因子。结果表明:2009—2019年研究区表层水稻土平均总有机碳(TOC)、 C_a 和 C_a 减少,而平均 C_a 增加;TOC、 C_a 、 C_a 和 C_a 的变化速率分别为-0.04、-0.02、-0.07 g·kg⁻¹·a⁻¹和0.05 g·kg⁻¹·a⁻¹(P>0.05)。土壤属性对2019年东乡地区表层水稻土TOC、 C_a 和 C_a 的空间变异影响较小,而土壤全氮(TN)对TOC、 C_a 和 C_a 的变化幅度较大,而西南和东南地区变化幅度较小,因此,未来红壤区水稻土固碳应重视各有机碳组分的时空分异。

关键词:红壤区;活性碳库;缓效性碳库;惰性碳库;时空变异;水稻土固碳

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)03-0589-10 doi:10.11654/jaes.2022-0745

Spatio-temporal variations of soil organic carbon pools of paddy soil in a typical red soil region from 2009 to 2019

WANG Xiyang^{1,2}, LI Liang^{1,2}, LI Xiaohui^{1,2}, XIN Zaijun^{1,2}, HE Shifu^{1,2}, SUN Xiaoyan^{1,2*}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Environmental Microbiology, Institute of Microbiology, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Institute of Watershed Ecology, Nanchang 330096, China)

Abstract: It is important to grasp the spatial and temporal changes of soil organic carbon (SOC) pools in time to take effective measures to enhance agroecosystem carbon sink. In this study, a new round of soil sample collection was carried out based on historical sampling information, and the samples were analyzed based on a method of CO_2 –C release during a 100–day incubation. The data from incubation experiments were fitted to a three–pool first–order kinetics model to obtain the sizes of active (C_a) , slow (C_s) and resistant (C_r) SOC pool, which would be used to reveal the spatial–temporal changes of C_a , C_s , and C_r in the surface paddy soil in Dongxiang area in Jiangxi Province from 2009 to 2019 and their main influencing factors. The results showed that from 2009 to 2019, the total organic carbon (TOC), C_a and C_s in the surface paddy soil in Dongxiang area decreased (on average), while C_r increased (on average); the change rates of TOC, C_a , C_s , and C_r were -0.04, -0.02, -0.07 g·kg⁻¹·a⁻¹ and 0.05 g·kg⁻¹·a⁻¹, respectively (P>0.05). Soil properties made a small contribution to the spatial variations of the TOC, C_a and C_r in the surface Dongxiang paddy soils in 2019, however, soil total nitrogen (TN) played a major role in controlling the variation of TOC, C_s and C_r at the same time, thus, the synergistic variation of soil N content should be paid attention to when

收稿日期:2022-07-23 录用日期:2022-09-19

作者简介:王玺洋(1988—),男,江西南昌人,博士,助理研究员,主要从事土壤质量演变及生态修复研究。E-mail:wxy219soil@163.com

^{*}通信作者:孙小艳 E-mail:xiaoyan_sun05@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41867002);江西省重点研发计划项目(20202BBFL63048);江西省科学院重点研发项目(2020-YZD-27);国家 红壤改良工程技术研究中心开放基金项目(2020NETRCRSI-3)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41867002); The Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20202BBFL63048); The Key Research and Development Project of Jiangxi Academy of Sciences (2020-YZD-27); National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement (2020NETRCRSI-3)

developing carbon sequestration measures in paddy soil. In addition, in the past 10 years, the variation range of paddy SOC component and its composition in the northern and central regions of the study area was large, while the variation range was small in the southwest and southeast regions of the study area. Therefore, in the future, the spatial and temporal variations of different SOC pools should be highlighted in carbon sequestration in the paddy soils in red soil region.

Keywords: red soil region; active SOC pool; slow SOC pool; resistant SOC pool; spatio-temporal variation; carbon sequestration in paddy soil

加强陆地生态系统碳"汇"作用是减缓大气中CO₂浓度持续上升和实现"碳中和"目标的一个重要途径^[1]。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统中最大的碳库^[2-4],其中农田SOC由于长期受到人为活动的影响而表现得最为活跃^[5-6],其增加、减少或稳定都将显著影响大气CO₂浓度以及全球气候变化^[5-7]。当前围绕SOC动态变化,根据其稳定性差异将其划分为多个组分库来研究,这将更有利于切实有效地把握土壤固碳机制并制定固碳措施^[8-9]。

根据土壤中含碳有机化合物矿化分解的难易程 度,多数研究将SOC划分为活性碳、缓效性碳和惰性 碳3个组分库[9-12]。其中,活性碳库分解速率快,在土 壤中驻留时间短,因此这部分有机碳与土壤养分供应 密切相关,但其很不稳定,不能真正固定于土壤中[13]; 缓效性碳库对应的有机碳多为碳水化合物、颗粒有机 物、脂类等半分解有机物或与团聚体结合的有机物, 其在土壤中周转和分解速率相对较慢,被认为是土壤 固定有机碳的主要碳库[14];而惰性碳库主要是木质 素、腐殖质、多酚及被团聚体紧密保护的多糖等,其在 土壤中难以分解且周转时间相当长,多以千年计[15]。 尽管直接测定这些概念性土壤碳库的大小存在困 难^[16],但一级动力学方程可以很好地描述SOC的分解 过程,并且土壤CO2-C释放量的线性拟合曲线一般满 足指数函数模型[8,17],因此,利用土壤呼吸培养实验, 借助三库一级动力学模型,成为分析活性碳库大小 (C_a) 、缓效性碳库大小 (C_s) 和惰性碳库大小 (C_r) 较为 有效和准确的方法[8,18]。

基于以上方法,国内外已取得一些关于农业SOC组分库的研究进展,如Collins等[19]研究了美国中东部玉米带区SOC组分库,结果显示,该地区表层土壤活性碳库在土壤总有机碳中的占比为3%~8%,其缓效性碳库在总有机碳库中的占比为50%,在亚表层中该比例达到65%。采用同样的方法,邵月红等[20]和Qian等[21]研究了江西余江县水稻土、旱作潮土和旱作红壤3种土壤类型的SOC组分库构成,结果表明,土壤类

型显著影响了耕地表层SOC组分构成,除此之外,黏 粒含量、土壤碳氮比和pH对红壤区耕地SOC组分库 构成也产生了重要影响。张忠启等[22]利用土壤类型 邻接法结合地统计学克里格空间插值获得的东乡地 区 2009 年表层土壤 C_a 、 C_s 和 C_r 空间分布图显示,各碳 库大小均呈现由东南向西北减少的趋势。Wang 等[23] 利用 18 个具有代表性的典型县农业土壤 C_a 、 C_s 和 C_r 数据初步刻画了我国农业土壤碳组分区域分布特征, 主要结论为我国农田表层SOC中 C_a 、 C_s 和 C_c 占比分别 为 2.37%、35.40% 和 62.23%, 其中北方地区旱地表层 SOC 中活性碳构成比例低于南方地区,而惰性碳构成 比例高于南方地区,与旱地表层土壤相比,水田表层 土壤可以固定更多的活性碳和缓效性碳。此外,农田 管理措施更多地是对土壤活性碳库空间分异产生影 响。同时期,Wang等[6,24]利用主控因子建立SOC组分 含量的预测方法来研究成都平原区水稻土和东北黑 土区旱地 SOC 组分库在 1980—2010 年的变化特征, 揭示了成都地区水稻土固碳过程中各组分库的贡献 及东北黑土丢碳过程中各组分的贡献。然而,关于红 壤区稻田SOC组分库在时间序列上的变化研究较少, 特别是近10年来,南方红壤区水稻土正在逐步开展 大规模的土壤改良或治理行动,如秸秆还田、高标准 农田建设、地力提升、化肥减施增效以及安全利用等, 这些措施将直接影响SOC组分库的构成或间接通过 改变土壤理化性质来调控各组分库的周转和稳 定[21,25]。因此,有必要弄清近10年来红壤性水稻土 SOC组分库的时空变异特征及其潜在影响因子,其 中,基于历史点位信息开展新一期邻近点位采样获取 的研究数据将更有实际意义和田间指导价值。

基于已有的2009年的历史数据,本研究选择红壤典型分布区——江西东乡为研究区,采用土壤呼吸培养实验,借助三库一级动力学模型,获取研究区2019年表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 数据,并结合相对应的土壤理化指标,揭示影响东乡地区表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 时空变化的主要因子,为南方地区农业生态系统

高效固碳提供技术参考。

材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于江西省抚州市东乡区(116°20′~ 116°51′E,28°02′~28°30′N),总面积约为1270 km²。 该地区属亚热带湿润季风气候,多年年均气温为 17.7 ℃, 年降水量 1 712 mm。 地形以低丘为主, 南北 多高丘,丘陵面积占51%,平原岗地占49%。东乡地 区农田土壤主要为红壤性水稻土,为南方典型的双季 稻种植区(图1)。成土母质有第四纪红色黏土、泥质 岩类风化物、红砂岩类风化物、石英岩类风化物和花 岗岩类风化物等[22]。

1.2 样品采集与室内分析

本研究中样品采集分别于2009年和2019年的 11月晚稻收割后进行,以东乡地区土壤图为依据,采 用土壤类型-土地利用联合单元法进行布点,各土壤 类型样点数目按面积比例进行分配且保证空间分布 大致均匀(图1)。其中,2009年21个水稻土表层(0~ 20 cm)样品是在"中国科学院战略性先导科技专项资 助项目(XDA05050507)"的支持下采集完成;2019年 水稻土样品采集时,不仅采集了2009年样点邻近位

置的样品,还对全域水稻土进行了加密采样,共采集 表层样品115个,以更全面了解东乡地区水稻土有机 碳组分库近况。

土壤基本理化指标测定参照《土壤农业化学分析 方法》[26],其中:土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾 (浓硫酸)氧化-外加热法测定;土壤pH值采用电位法 测定;全氮(TN)采用半微量凯氏法测定;土壤全磷 (TP)采用HF-HClO₄-HNO₃消煮-钼锑抗比色法测 定:土壤全钾(TK)采用HF-HClO4-HNO3消煮-火焰 光度法测定:土壤速效磷(AP)采用NHAF-HCl提取-钼蓝比色法测定;土壤速效钾(AK)采用NH4OAc提 取-火焰光度法测定:土壤质地采用吸管法测定[27],其 中砂粒、粉粒和黏粒的粒径分别为大于等于 0.05 mm 小于2 mm、大于等于0.002 mm 小于0.05 mm 和<0.002 mm。每个指标的测定不少于3次重复,平行测定结 果之间允许绝对误差≤5%。

土壤惰性碳含量测定方法[28]: 称取1g过2 mm筛 的风干土样于消煮管中,加入6 mol·L-1 HCl 20 mL, 用可调温度的消煮板在115℃下消煮16h,消煮过程 中不断摇晃试管洗掉试管壁上积聚物质,样品冷却后 用蒸馏水洗至中性,然后在55℃下烘干,研磨过180 μm 筛,用重铬酸钾(浓硫酸)氧化-外加热法测得的

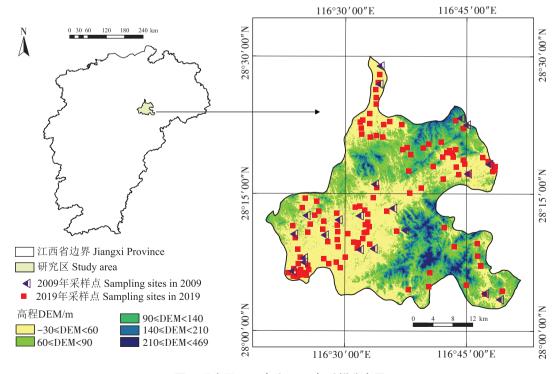


图 1 研究区 2009 年和 2019 年采样分布图

Figure 1 Location distribution maps of sampling points in the study area in 2009 and 2019

有机碳含量即为惰性碳含量。

采样点海拔高度利用地理信息系统 MAP GIS 10.2 空间分析工具从东乡地区数字高程(DEM)图中获得。

1.3 土壤呼吸培养

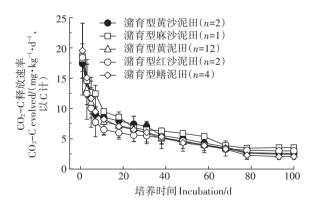
称取过1 mm 筛的风干土样 100 g于特制的呼吸 瓶中,将土样平铺于瓶的底部,根据土壤含水量及土 壤最大持水量计算出65%最大持水量时的需水量, 按此水量将水均匀地加入土壤中;装上通气管,并检 香是否密封:在吸收小瓶中用注射器注入20 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaOH(保证在要求时间内能吸收完释放的 CO₂,并有少量盈余),然后密封吸收瓶;将吸收瓶放 置在25 ℃的恒温培养箱内,黑暗条件下培养100 d。 开始两周内,每日通气两次,两周后每日通气一次,每 次通气 0.5 h; 分别在第 1、3、5、7、11、18、25、31、38、 48、58、68、78、93、100天,将吸收液用注射器全部抽 出后换上新的吸收液并按上述方法继续培养;在抽出 的吸收液中加20 mL1 mol·L⁻¹的BaCl₂, 摇匀后以酚 酞为指示剂,用0.4 mol·L⁻¹ HCl滴定中和未耗尽的 NaOH,通过HCl消耗量计算CO2的生成量,进而求出 不同时刻SOC的分解量(图2),用于迭代拟合[9]。

1.4 SOC 三库拟合

三库一级动力学模型[15]被公认为是描述 SOC 动态变化最佳的模型[29]。该模型将矿质土壤 TOC 划分为活性碳、缓效性碳和惰性碳 3个组分库,具体模型如下:

$$C_{\text{soc}} = C_{\text{a}} \times \exp(-K_{\text{a}} \times t) + C_{\text{s}} \times \exp(-K_{\text{s}} \times t) + C_{\text{r}} \times \exp(-K_{\text{r}} \times t)$$

$$(1)$$



数值为均值,误差线为标准差

Values are the means, and the error bars represent standard deviation

图 2 2019年不同类型水稻土 100 d室内呼吸培养实验的 SOC分解速率

Figure 2 Rates of SOC decomposition (CO₂ evolution) from different types of paddy soils during 100-d laboratory incubations in 2019

式中: C_{soc} 是 t 时刻 SOC 总量, $g \cdot kg^{-1}$; $C_a \cdot C_s$ 和 C_r 分别代表活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库的大小, $g \cdot kg^{-1}$; $K_a \cdot K_s$ 和 K_r 是相应各组分库的分解速率常数,其与模型中各自碳组分平均驻留时间(MRT)呈倒数关系。惰性碳库的 MRT 较长,一般将该组分碳田间 MRT 设定为 1 000 a,故对模型结果无影响[15]。 $C_s = C_{soc} - C_a - C_r$,其中 C_{soc} 表示初始样品 SOC 总量, $g \cdot kg^{-1}$ 。 另外,实验室得到的 MRT需要通过公式来转换,该转换公式可描述为:

$$MRT_{lab} = MRT_{field}/Q_{10}$$

 $Q_{10} = 2^{(25-MAT)/10}$ (2)

式中: MRT_{lab} 代表土壤样品碳组分室内平均驻留时间, $a;MRT_{field}$ 代表相应的田间平均驻留时间, $a;Q_{10}$ 是温度敏感系数,是对土壤呼吸速率随温度变化的一种度量[8]:MAT代表研究区年均温, $\mathbb{C}^{[19]}$ 。

公式(1)采用迭代运算过程^[9],通过非线性回归 拟 合 (PROC NLIN METHOD=Marquardt algorithm, SAS 9.3)获得未知参数 C_a 、 K_a 和 K_s 。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Shapiro-Wilk 检验数据正态性,不符合正态分布的数据进行对数转换后满足正态分布;利用 MAP GIS 10.2 地统计分析中的普通克里金插值法获得 2019 年东乡地区表层水稻土 $TOC_{c}C_{a}$ 、 C_{a} 和 C_{c} 的空间分布图,且其预测误差满足一定的精度要求(均方误差接近 0,均方根接近平均标准误,均方根标准误差接近 1);2009—2019 年东乡地区对应点位土壤 C_{a} 、 C_{c} 和 C_{c} 变化特征分布图由 MAP GIS 10.2 获取。

所有数据的描述性特征、Spearman 相关分析、配对 t 检验和回归分析均于 SPSS Statistics 26 软件下完成。

按照经典统计学方法分析,样本的变异系数(CV)在某种程度上可以反映样本的变异程度,在土壤科学中,根据CV值可以将土壤性质的变异程度进行分类:CV值在0~15%为弱变异,16%~35%为中等变异,大于36%为强变异[30]。

2 结果与分析

2.1 2009年SOC组分库描述性统计特征

东乡 2009 年表层 (0~20 cm) 水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 均 呈现强变异 (CV>36%),且变异程度依次增加(表1)。 C_a 、 C_s 和 C_r 在 TOC 中的占比(分别记作 P_a 、 P_s 、 P_r)分别为 1.05%~3.73%、23.95%~59.94%和 37.35%~74.20%,平均值分别为 2.70%、42.55%和 54.76%。

2.2 2019年SOC库空间分异特征

东乡2019年表层(0~20 cm)水稻土 Ca、Ca和 Ca交 间变异程度存在差异,其中: Ca 变异性最强(CV> 100%),存在少数较大或较小样本数值: C_8 也呈现强 变异(CV>36%);而C₁和TOC呈现中等变异(16%<CV≤ 35%)(表2)。相应地,反映在空间分布图上,TOC和 C_c 空间分布更连续、均匀(图 3A 和图 3D), C_a 在大部分 区域分布较为均匀(图 3B),而 C_s 空间分布则较为分 散和破碎化(图3C)。

2019年东乡地区表层水稻土Pa、Pa和Pr分别为 0.15%~11.57%、3.84%~61.17%和37.53%~93.32%,平 均值分别为1.56%、36.15%和62.29%。

根据半方差函数理论模型和相关参数(表3)可 知,东乡2019年表层水稻土TOC和C。的变异更多是 由随机因素产生的,样本间空间相关性较弱[$C_0/(C_0+$ C)>75%],相比之下, Ca和 Cr的变异更多是由结构性 因素引起,表现为中等强度的空间相关性[25%< C_{o} / $(C_0+C)<75\%$].

由各有机碳库空间分布图(图3)可知,东乡地区 2019年表层水稻土TOC空间分异特征明显,呈现自 西北向东南方向逐渐降低的分布趋势(图3A), C_a 集

表 1 东乡 2009 年表层 (0~20 cm) 水稻土 SOC 组分库 描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of SOC pools in surface paddy soil (0-20 cm) of Dongxiang in 2009

指标	样本数	均值	中值	最大值	最小值	变异系数
Index	Sample	Mean/	Median/	Maximum/	Minimum/	Coefficient
mucx	size	$(g \cdot kg^{-1})$	(g•kg ⁻¹)	$(g \cdot kg^{-1})$	(g•kg ⁻¹)	of variation
$C_{\rm a}$	21	0.57	0.53	1.29	0.16	0.49
$C_{\rm s}$	21	9.04	8.74	23.43	2.16	0.52
$C_{\rm r}$	21	12.14	10.29	34.15	5.02	0.63
TOC	21	21.75	16.59	58.87	7.57	0.53

表 2 东 乡 2019 年表层 (0~20 cm) 水稻土 SOC 组分库 描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics of SOC pools in surface paddy soil (0-20 cm) of Dongxiang in 2019

指标 Index	样本数 Sample size	均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	中值 Median/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Maximum/ (g·kg ⁻¹)	最小值 Minimum/ (g•kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient of variation
$C_{\rm a}$	115	0.32	0.24	3.06	0.03	1.21
$C_{\rm s}$	115	8.48	8.79	16.74	0.45	0.52
$C_{\rm r}$	115	13.48	13.13	23.39	6.23	0.27
TOC	115	22.29	22.51	37.21	8.96	0.29

表3 东乡2019年表层水稻土SOC库大小的半方差函数 模型及其参数

Table 3 Semi-variogram types of the sizes of SOC pools and their parameters in the surface paddy soil of Dongxiang in 2019

指标 Index	理论模型 Theoretical model	C_0	C_0 + C	$C_0/(C_0+C)$	变程 Range/m
TOC	球面模型	38.683	39.451	0.981	70 056
C_{a}	指数模型	0.265	0.461	0.574	10 979
$C_{ m s}$	指数模型	18.617	19.690	0.946	70 056
$C_{\rm r}$	球面模型	7.714	14.471	0.533	5 966

注: C_0 表示块金值, C_0+C 表示基台值。

Note: C_0 represents the nugget value: C_0+C represents the sill value.

中分布在0.2~0.5 g·kg-1范围内,小范围地区分布着较 大或较小的样本值(图3B),C。空间分布较为破碎(图 3C), C 空间分布相对均匀(图 3D)。

2.3 2009-2019年研究区水稻土SOC库时空变化

由图4可知,近10年东乡地区表层水稻土TOC、 C_a 、 C_s 和 C_r 未产生显著性变化(P>0.05),变化速率分 别为-0.04、-0.02、-0.07 g·kg⁻¹·a⁻¹和 0.05 g·kg⁻¹·a⁻¹。 其中, Ca、Cs、Pa和Ps的平均值在这10年分别降低0.19 g·kg⁻¹、0.75 g·kg⁻¹、0.88%和5.88%;而 C_r和 P_r则分别 增加 0.53 g·kg⁻¹和 6.76%。

进一步分析可知(图5),近10年研究区不同点位 表层水稻土SOC组分库的时空变化差异较大,其中, 中部和北部地区表层水稻土SOC组分库变化幅度较 大,而西南和东南地区变化幅度较小。该地区表层水 稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 近10年出现增加的点位占比分别为 19.0%、52.4%和71.4%,出现减少的点位占比分别为 81.0%、47.6%和28.6%(图5A)。可见,研究区表层水 稻土 C,近 10年呈现增加的点位占多数,而 C。呈现降低 的点位更多。其中, C_a 、 C_s 和 C_r 最大增幅分别达到 284.2% (DX20)、255.5% (DX58)和 237.2% (DX58), 最大降幅分别为-87.9%(DX29)、-92.4%(DX29) 和-75.4%(DX11)。

此外,两时期邻近点位表层水稻土 P_a 、 P_s 和 P_r 的 变化同样表现为中部和北部地区变化幅度较大,而西 南和东南地区变化幅度较小(图5B)。Pa、Pa和Pr近 10年升高的点位分别占14.3%、47.6%和52.4%,而降 低的点位占比分别为85.7%、52.4%和47.6%。从构 成比例来看,东乡地区近10年表层水稻土SOC库中 更多点位的Pa出现降低。Pa、Pa和Pr最大增幅分别为 8.24%(DX20)、23.00%(DX24)和49.02%(DX29),而 最大降幅分别为-3.01%(DX53)、-46.68%(DX29) 和-21.15%(DX24)。

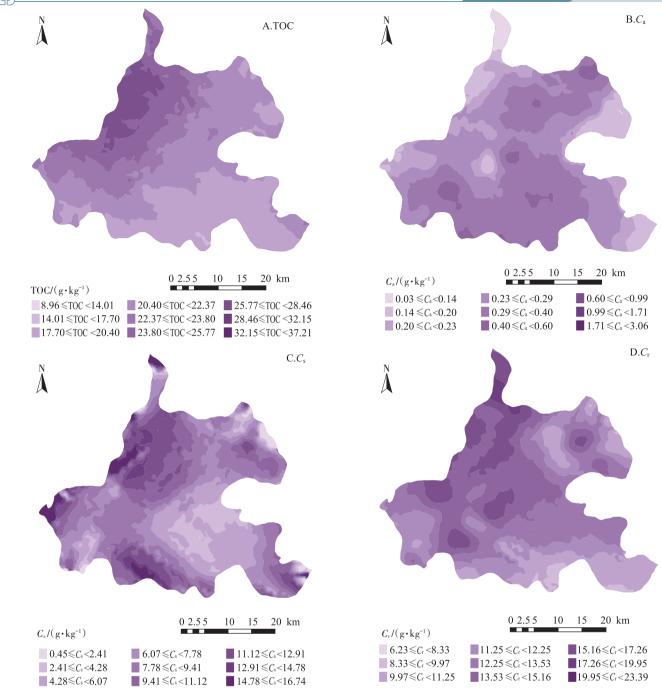


图 3 东乡 2019 年表层水稻土 $TOC_{s}C_{s}$ 、 C_{s} 和 C_{r} 的空间分布

Figure 3 Spatial distribution of the pool sizes of the TOC, C_a , C_s , and C_r in the surface paddy soil of Dongxiang in 2019

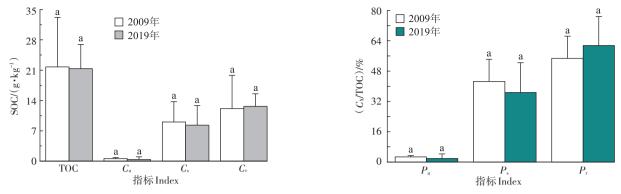
2.4 影响东乡水稻土SOC库时空变化的主要因子

相关分析结果表明(表4),东乡地区2009年表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 主要与土壤TN和TOC呈显著正相关,此外, C_s 与水稻土类型呈显著负相关, C_r 和TOC与土壤粉粒呈显著正相关。到2019年,东乡地区表层水稻土 C_s 与土壤TOC、TN呈显著正相关, C_r 与土壤TN、TOC、TP和AK呈显著正相关,TOC与土壤TN和

AK 呈显著正相关, 而 C_a 与这些土壤理化指标均无显著相关性。

选择这些显著相关的因子进行线性回归分析,结果(图6)显示,2009年,由预测因子建立的回归模型对 $TOC_{\circ}C_{a}$ 、 C_{\circ} 和 C_{\circ} 变异的解释度分别为 76%、73%、70% 和 88%;2019年,由预测因子建立的回归模型对 $TOC_{\circ}C_{\circ}$ 和 C_{\circ} 变异的解释度分别为 21%、67% 和 49%。



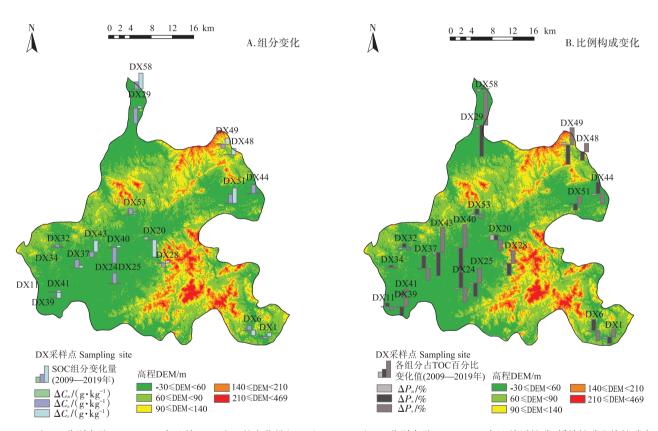


误差线代表标准差(n=21),同组不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Error bars represent standard deviation (n=21), different lowercase letters indicate significant differences among treatments at P < 0.05.

图 4 2009 年和 2019 年两时期邻近点位表层水稻土 TOC 及其组分构成比较

Figure 4 Comparison of the TOC and its fractions in the surface paddy soils from the adjacent sites in the 2009 and 2019



 ΔC_a 、 ΔC_s 和 ΔC_r 分别表示 2009—2019 年土壤 C_a 、 C_s 和 C_r 的变化量(n=21), ΔP_a 、 ΔP_s 和 ΔP_r 分别表示 2009—2019 年土壤活性碳、缓效性碳和惰性碳在 TOC 中构成比例的变化(n=21)。

 $\Delta C_{\rm a}, \Delta C_{\rm s}$ and $\Delta C_{\rm r}$ stand for the variations of $C_{\rm a}, C_{\rm s}$ and $C_{\rm r}$ from the 2009 to the 2019, respectively; $\Delta P_{\rm a}, \Delta P_{\rm s}$ and $\Delta P_{\rm r}$ stand for the variations of the proportions of the $C_{\rm a}, C_{\rm s}$ and $C_{\rm r}$ in the TOC from the 2009 to the 2019, respectively.

图 5 2009—2019 年东乡地区邻近点位表层水稻土 SOC 组分库大小及其比例构成变化分布

Figure 5 Distribution of variations in the pool sizes and their proportions in the surface paddy soils in the adjacent sites of Dongxiang from 2009 to 2019

根据预测变量进入模型产生的 R²变化和标准化系数 Beta 值,可以确定各预测因子对因变量变异的贡献大小。由图 6 可知,2009 年和 2019 年两时期东乡地区

表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_s 空间变异主要受土壤TOC变异的影响,此外,2019年 C_s 和 C_s 空间变异还受制于土壤TN,以及土壤TP和AK对 C_s 变异同样产生较大的影

响,而TOC空间变异主要受制于土壤TN变异。

3 讨论

SOC组分构成复杂多样,而且不同用地类型 SOC组分库构成存在差异[12]。2009年东乡地区表层水稻土 P_a 小于3%, P_i 略高于50%(表1);至2019年该地区表层水稻土 P_a 小于2%, P_i 超过了60%(表2)。与其他类型 SOC组分库构成相比[9.12,20],本研究土壤符合一般的 SOC组分构成特征,即存在一个较小的活性碳库(<5%)和一个较大的惰性碳库(>50%)。

本研究中,东乡地区 2019年表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 空间分布趋势迥异,且均与土壤 TOC 的空间分布趋势存在较大差异(图 3)。这种空间分布特征与张忠启等[22]获得的 2009 年东乡表层土壤 TOC、 C_a 、 C_s 和 C_r

空间分布趋势差异较大,这种差异一方面来自于东乡地区近10年的变化,另一方面主要来自空间预测方法的差异,本研究利用野外加密采样获得的实测数据进行地统计学克里格空间预测,而后者在原有的22个点位数据基础上进行土壤类型GIS连接法估算,继而进行克里格插值预测,两种方法获得的空间分布图存在固有差异。

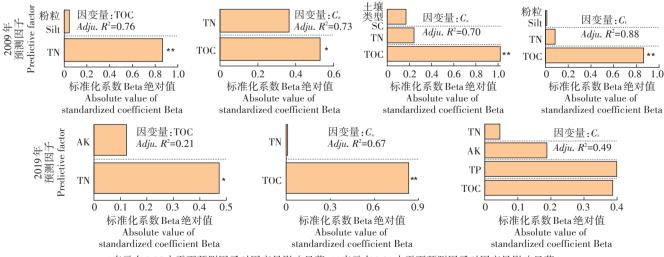
东乡地区表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 空间变异不仅与对应点位初始 SOC 的空间分布有关,还受到了土壤理化环境的间接影响。相关分析结果显示(图 6),影响2019 年研究区 C_a 、 C_s 和 C_r 变异的因子存在较大差异,其中 C_a 变异受土壤常规理化性质、地形和土壤类型影响较小, C_s 和 C_r 变异受土壤理化性质影响较大,影响 C_r 变异的土壤因子较为复杂。由回归分析可知,土壤

表4 表层水稻土各SOC库大小与土壤理化特性之间相关性分析

Table 4 Correlation analyses (Spearman's tests) between the pool sizes of SOC and their physicochemical properties

年份 Year	指标 Index	高程 Elevation	土壤类型 Soil category	рН	TN	TOC	TP	TK	AP	AK	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
2009年	$C_{\rm a}$	0.03	-0.41	-0.03	0.79**	0.84**	0.03	0.24	-0.05	-0.10	0.05	0.40	-0.07
(n=21)	$C_{ m s}$	0.05	-0.45*	-0.38	0.73**	0.77**	0.13	-0.01	-0.10	0.01	-0.15	0.23	0.26
	$C_{\rm r}$	-0.04	-0.25	0.02	0.86**	0.90**	0.20	0.20	0.13	0.14	-0.28	0.52*	0.03
	TOC	0.02	-0.37	-0.12	0.96**	1.00	0.20	0.16	0.10	0.09	-0.20	0.44*	0.10
2019年 (n=21)	C_{a}	0.39	0.23	0.33	-0.14	-0.29	-0.25	0.08	-0.04	-0.15	0.00	0.31	-0.15
	$C_{ m s}$	0.04	-0.31	-0.36	0.45*	0.81**	0.07	-0.01	0.18	0.13	0.14	-0.15	-0.17
	$C_{\rm r}$	0.04	0.03	-0.07	0.48*	0.53*	0.65**	0.19	0.27	0.51*	-0.24	0.05	0.15
	TOC	-0.05	-0.23	-0.38	0.69**	1.00	0.38	0.14	0.35	0.45*	0.00	-0.11	-0.07

注:*表示在0.05水平下相关性显著;**表示在0.01水平下相关性显著。 Note:*Significant at *P*<0.05;**significant at *P*<0.01.



*表示在 0.05 水平下预测因子对因变量影响显著;**表示在 0.01 水平下预测因子对因变量影响显著。
*,a significant impact on the dependent variable at *P*<0.01;

图 6 2009 年和 2019 年东乡地区表层水稻土各 SOC 库大小与其影响因子回归分析(n=21)

Figure 6 Regression analysis of SOC pools and their influencing factors in surface paddy soil of Dongxiang from 2009 to 2019

基本理化性质在一定程度上可以解释2019年研究区 表层水稻土有机碳组分库的空间变异 $(C_a$ 除外),但其 解释水平较2009年有较大降低。此外,地形和土壤 类型对 C_a 、 C_s 和 C_c 变异的影响均较小。较大可能是因 为外部农田管理(秸秆还田、利用年限、耕作制度等) 对近10年研究区表层水稻土SOC组分库空间变异的 直接或间接影响在增强四。农田管理措施不仅可以 通过有机物料的输入直接改变SOC组分构成[32],而且 其还会通过改变土壤物理结构来影响土壤微生物碳 利用效率, 进而影响 SOC 库组分的周转和固持[33]。对 于占比较小且易分解的 C_a ,这种影响作用在短时间都 可能对其变异有显著贡献,而近10年来研究区农田 管理措施的空间差异性则会加剧该地区表层水稻土 SOC组分库的空间分异特征。

从时间序列上来看,2009-2019年研究区表层 水稻土 TOC_sC_a 和 C_s 均值降低,而 C_r 均值增加,但这些 变化在统计学上并未达显著水平(图5)。同时,对 2009年和2019年研究区表层水稻土SOC组分库变异 均起重要控制作用的TOC和TN,在这10年间也未发 生显著变化(配对t检验,P>0.05)。尽管如此,不同点 位的表层水稻土 C_a 、 C_s 和 C_r 近10年的时空分异仍然 较大,主要表现在研究区北部和中部表层水稻土SOC 组分变化幅度较大,而西南和东南地区SOC组分变化 幅度较小,局部点位变化幅度差异较大。这些差异可 能归因于不同的农田管理措施对SOC组分产生的短 期激发效应存在差异,包括秸秆还田、土地利用和利 用年限等[33-35]。这就需要在后期土壤固碳管理中因 地制官地采取措施,重视农田土壤固碳的精准性和个 性化管理。

结论

- (1)2019年东乡地区表层水稻土各有机碳库变 异强度表现为 $C_a > C_s > TOC > C_r$ (中等以上),土壤属性 对 $TOC_{s}C_{a}$ 和 C_{r} 空间变异的贡献度较小。
- (2)尽管2009—2019年研究区表层水稻土平均 $TOC_{s}C_{s}C_{s}$ 和 C_{s} 的变化未达显著水平,但各点位之间 的碳组分仍呈现较大的时空分异,这很可能是因为近 10年来差异化的农田管理措施产生了不同的短期激 发效应所致。

参考文献:

[1] YANG Y, SHI Y, SUN W, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Sci-

- ence China Life Sciences, 2022, 65(5):861-895.
- [2] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [3] LIU Y, YU D, WANG N, et al. Impacts of agricultural intensity on soil organic carbon pools in a main vegetable cultivation region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134:25-32.
- [4] WITZGALL K, VIDAL A, SCHUBERT D, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon [J]. Nature Communications, 2021, 12:4115.
- [5] YAN X, CAI Z, WANG S, et al. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. Global Change Biology, 2011, 17(3):1487-1496.
- [6] WANG X, YU D, LI C, et al. Characteristics of variations in the organic carbon fractions in paddy soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(4):983-991.
- [7] KAN Z R, LIU W X, LIU W S, et al. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective [J]. Global Change Biology, 2022, 28:693-710.
- [8] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081):165-173.
- [9] WANG X, MIN F, YU D, et al. Mean residence times of active and slow soil organic carbon pools in croplands across China[J]. CATENA, 2021, 202:105271.
- [10] TRUMBORE S E, CHADWICK O A, AMUNDSON R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. Science, 1996, 272(5260):393-396.
- [11] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]. 北 京:中国农业科学院, 2008:1-2. TONG X G. Change characteristics of soil organic carbon pools in typical cropland of China under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008:1-2.
- [12] IQBAL J, HU R G, LIN S, et al. Carbon dioxide emissions from ultisol under different land uses in mid-subtropical China[J]. Geoderma, 2009, 152(1):63-73.
- [13] 王玺洋, 于东升, 廖丹, 等. 长三角典型水稻土有机碳组分构成及 其主控因子[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4729-4738. WANG X Y, YU D S, LIAO D, et al. Characteristics of typical paddy soil organic carbon fractions and their main control factors in the Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15):4729-4738.
- [14] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32 (14):2099-2103.
- [15] PAUL E A, COLLINS H P, LEAVITT S W. Dynamics of resistant soil carbon of midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ¹⁴C abundance[J]. Geoderma, 2001, 104(3/4):239-256.
- [16] CHRIS J, CLAIRE M C, KEVIN C, et al. Global climate change and soil carbon stocks: Predictions from two contrasting models for turnover of organic carbon in soil[J]. Global Change Biology, 2005, 11 (1):154-166.

- [17] COLLINS H P, CHRISTENSON D R, BLEVINS R L, et al. Soil carbon dynamics in corn-based agroecosystems: Results from carbon-13 natural abundance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3):299-302.
- [18] PARTON W J, STEWART J W B, COLE C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A model[J]. Biogeochemistry, 1988, 5(1): 109–131.
- [19] COLLINS H P, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2):157-168.
- [20] 邵月红, 潘剑君, 孙波, 等. 农田土壤有机碳库大小及周转[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1):19-23. SHAO Y H, PAN J J, SUN B, et al. Pool sizes and turnover rates of farmland soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1):19-23.
- [21] QIAN H Y, PAN J J, SUN B. The relative impact of land use and soil properties on sizes and turnover rates of soil organic carbon pools in subtropical China[J]. Soil Use and Management, 2013, 29 (4): 510– 518.
- [22] 张忠启, 于东升, 潘剑君, 等. 红壤典型区不同类型土壤有机碳组分构成及空间分异研究[J]. 土壤, 2015, 47(2): 318-323. ZHANG Z Q, YU D S, PAN J J, et al. Study on soil organic carbon components and its spatial variability of different soil types in hilly red soil region [J]. Soils, 2015, 47(2): 318-323.
- [23] WANG X, YU D, XU Z, et al. Regional patterns and controls of soil organic carbon pools of croplands in China[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1/2):525-539.
- [24] WANG X, YU D, WANG C, et al. Variations in cropland soil organic carbon fractions in the black soil region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184:93-99.
- [25] XIA S P, SONG Z L, WANG Y D, et al. Soil organic matter turnover depending on land use change: Coupling C/N ratios, δ ¹³C and lignin biomarkers[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32 (4): 1591–1605.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Soil agro-chemistrical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

- [27] DI STEFANO C, FERRO V, MIRABILE S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):205-215.
- [28] LEAVITT S W, PAUL E A, PENDALL E, et al. Field variability of carbon isotopes in soil organic carbon[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1997, 123B:451-454.
- [29] PAUSTIAN K, PARTON W J, PERSSON J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2):476-488.
- [30] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4):198-206. GUAN X Y, WANG S L, GAO Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 198-206.
- [31] 郭乃嘉, 史学正, 赵永存, 等. 人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究: 以典型黑土区和水稻土区为例[J]. 土壤学报, 2016, 53(5):1097-1106. GUO N J, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Comparative study on impacts of anthropogenic and environment factors on soil organic matter: A case study of typical black soil region and paddy soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5):1097-1106
- [32] LUO Z, VISCARRA ROSSEL R A, SHI Z. Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change[J]. Global Change Biology, 2020, 26(8):4614-4625.
- [33] ZHAO H, LV Y Z, WANG X K, et al. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2012, 189/190: 397–403.
- [34] CHEN A L, XIE X L, GE T D, et al. Rapid decrease of soil carbon after abandonment of subtropical paddy fields[J]. *Plant and Soil*, 2017, 415;203–214.
- [35] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6):1381-1392. ZHANG Y Y, MO F, HAN J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6):1381-1392.

(责任编辑:李丹)