

湖南省水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素

沈璇瑒¹, 段良霞¹, 欧阳宁相², 盛浩¹, 袁红¹,
张亮¹, 张扬珠¹, 周清¹, 谢红霞^{1*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410000; 2. 湖南财政经济学院工程管理学院, 湖南长沙 410000)

摘要:【目的】按土壤剖面发生层分析水稻土有机碳剖面分布特征及其影响因素。【方法】通过测定湖南省 58 个水稻土剖面各发生层土壤有机碳含量, 分析水稻土剖面有机碳分布特征, 并利用地理探测器解析水稻土有机碳含量空间分异的影响因素。【结果】①湖南省水稻土剖面土壤有机碳平均含量为 9.30 g kg^{-1} , 其在发生层上的分布表现为耕作层 (22.94 g kg^{-1}) > 犁底层 (15.09 g kg^{-1}) > 底土层 (6.93 g kg^{-1})。②不同成土母质发育的土壤中, 石灰岩风化物发育的水稻土发生层有机碳含量最大; 不同质地的土壤中, 水稻土各类发生层有机碳含量整体上表现为随粉粒含量的增加而增大。③各发生层有机碳空间分布均呈现西南高, 东北低的格局。④地理探测器结果显示, 容重对各发生层水稻土有机碳含量空间分异解释程度最高, 且与其他因子交互之后解释力显著增强。【结论】湖南省水稻土有机碳含量在不同剖面发生层存在显著性差异, 其空间分布是由多因子交互作用形成的, 容重对各发生层有机碳解释力最高。

关键词: 土壤有机碳; 发生层; 成土母质; 质地; 地理探测器

中图分类号: S155 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)01-0084-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022093003

沈璇瑒, 段良霞, 欧阳宁相, 盛浩, 袁红, 张亮, 张扬珠, 周清, 谢红霞. 湖南省水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 84-92

SHEN Xuan-yang, DUAN Liang-xia, OUYANG Ning-xiang, SHENG Hao, YUAN Hong, ZHANG Liang, ZHANG Yang-zhu, ZHOU Qing, XIE Hong-xia. Profile Distribution Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 84-92

【研究意义】为应对全球气候变化, 2021 年 4 月 30 日中共中央政治局召开会议首次提出实现碳达峰和碳中和的目标, 实现碳达峰、碳中和本质上是一场前所未有的绿色工业化革命^[1]。农田土壤有机碳是全球碳循环的重要组成部分, 其贮存的碳占全球陆地碳储量的 8%~10%^[2-3], 因而农田土壤有机碳提升与碳达峰和碳中和目标的早日实现密切相关。水稻土作为我国主要的农业土壤, 其分布面积约占全国耕地土壤总面积的 1/4^[4], 其碳储量较高且固碳潜力远高于旱地土壤, 深入研究水稻土有机碳的剖面分布及影响因素对区域土壤资源优化利用和正确认识农田碳循环机理具有重要意义^[5]。

【前人研究进展】关于有机碳剖面分布特征已有大量研究^[6-8], 如李珊等^[9]利用指数递减函数拟合成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征; 杨敏等^[10]以祁连山中段的 97 个典型土壤剖面为对象, 分析土壤有机碳含量的剖面垂直分布模式; 胡莹洁等^[11]通

过 40 个土壤剖面研究北京平原区土壤有机碳垂直分布特征。然而以往研究多将水稻土剖面按照固定深度统一划分层次进行研究^[12-14], 关于水稻土不同发生层有机碳的分布特征及影响因素的研究相对较少^[15-16]。王绍强等^[17]认为按等间隔测度方法计算土壤有机碳含量会忽略土壤发生学的影响因素; 史军等^[18]研究发现采用固定深度分层较按发生层来测定土壤碳含量, 结果偏差更大; 郑琳等^[19]研究发现按固定深度取样表层 (0~30 cm) 土壤有机碳密度占主体地位, 而按发生层取样时, 淀积层因厚度较大有机碳密度最高, 两种取样方法得到的土壤有机碳密度差异显著。Davidson^[20]研究认为按深度计算剖面有机碳低估了土壤中碳的流失。【本研究切入点】湖南省是我国主要水稻种植区, 水稻土是在人为活动影响下经长期水耕熟化过程形成的特殊土壤, 不同发生层水分状况、理化性质存在明显差异, 按照固定深度分层而非发生分层研究水稻土有机碳, 会掩盖其剖

收稿日期: 2022-09-30; 修订日期: 2023-02-28

基金项目: 国家科技基础性工作专项项目课题 (2014FY110200) 资助

作者简介: 沈璇瑒 (1997-), 女, 湖北省孝感市人, 硕士研究生在读, 主要研究方向土地资源与信息技术。E-mail: 2363105039@qq.com

*通讯作者: E-mail: xiehongxia136@sina.com

面发生学特性甚至导致有机碳估算的偏差。【**拟解决的问题**】本研究从剖面发生层分析湖南省水稻土有机碳分布特征及其影响因素, 有助于科学系统地阐述水稻土有机碳在剖面垂直方向中的分异, 旨在为准确估算湖南省水稻田土壤有机碳储量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省位于长江中下游, $108^{\circ}47' \sim 114^{\circ}15' E$; $24^{\circ}39' \sim 30^{\circ}08' N$, 属于大陆性亚热带季风湿润气候, 湖南省地貌类型多样, 呈现东、南和西面山地围绕, 北部洞庭湖平原展布, 中部丘岗起伏的复杂地貌。湖南省是典型的农业大省, 以粮食为主, 其中又以水稻种植最为广泛。境内典型成土母质主要有紫色砂页岩风化物、第四纪红色黏土、石灰岩风化物、近代河湖冲积物和沉积物、砂岩风化物、板页岩风化和花岗岩风化物等七大类。

1.2 数据来源及处理

研究数据依托于“湖南省土系调查与土系志编制(2014FY110200A15)”项目, 于2014—2016年进行野外剖面发生层土壤样品采集。本研究选取58个

水稻土典型剖面(图1), 共采集土壤样品327个, 涵盖了湖南省6种典型成土母质: 板页岩风化物(11个)、紫色砂页岩风化物(9个)、花岗岩风化物(8个)、第四纪红色黏土(12个)、石灰岩风化物(11个)和近代河湖冲积物和沉积物(7个)。采用环刀法测定土壤容重; 采用重铬酸钾氧化—滴定法测定土壤有机碳含量; 土壤粒径组成用吸管法测定, 依据土壤黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.5\text{ mm}$)及砂粒($0.05 \sim 2\text{ mm}$)的含量比例, 比照美国农业部土壤质地分类三角坐标图进行土壤质地划分。

为方便比较, 将系统分类划分的所有土壤剖面发生层次归纳为3层, 即耕作层(Ap1)、犁底层(Ap2)和底土层(犁底层以下土层), 其中耕作层土层平均厚度为14.98 cm, 犁底层土层平均厚度为9.12 cm, 底土层土层平均厚度为106.62 cm。各发生层指标采用土层厚度加权平均计算。

基于现有对土壤有机碳相关影响因子的研究, 结合数据的可获取性, 选取了以下因子作为与有机碳含量密切相关的因子进行研究: 高程、坡度、坡向、成土母质及土壤容重、黏粒、粉粒和砂粒含量。其中高程、坡度和坡向均从中科院计算机网络信息

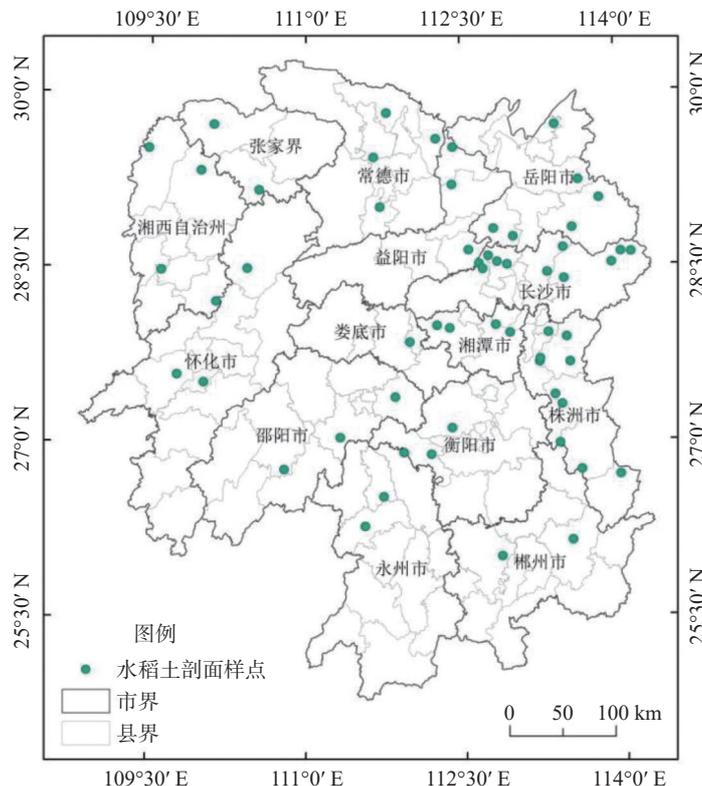


图1 研究区剖面样点分布图
Fig.1 Distribution of sampling points in the study area

中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载的 30 m 分辨率的 ASTERGDEM 高程数据中提取。

1.3 研究方法

本研究利用地理探测器进行各发生层有机碳含量空间分异的影响因素研究。地理探测器是由王劲峰等^[21]提出的一种探测空间分异性,并揭示其背后驱动力的统计学方法。能客观地识别出自变量对因变量的解释程度,它包括因子探测、交互作用探测、生态探测和风险探测 4 个部分。本研究主要使用因子探测和交互探测。

1.3.1 因子探测器 探测某影响因子对土壤有机碳的空间分异解释程度大小,并检验解释程度的可信

度。解释程度大小用 q 表示,见公式(1)。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \times \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中, q 为某指标的空间异质性; N 为研究区全部样本数; σ^2 为指标的方差; $h=1, 2, \dots, L$, h 为标识分区, L 为分区数目。 q 值的值域介于 0~1, q 值越大,表明该因子的解释力越强,反之亦然。

1.3.2 交互作用探测器 识别各影响因子的两两交互作用对土壤有机碳的空间分异性解释程度是否会增加或者是减弱。通过对比单个因子作用时的 q 值与双因子交互作用时的 q 值将交互作用类型分为 5 类(表 1)。

表 1 交互作用类型及判别依据
Table 1 Interaction types and discriminant basis

交互作用类型 Interaction type	判别依据 Discriminant basis
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

2 结果与分析

2.1 不同发生层有机碳分布差异

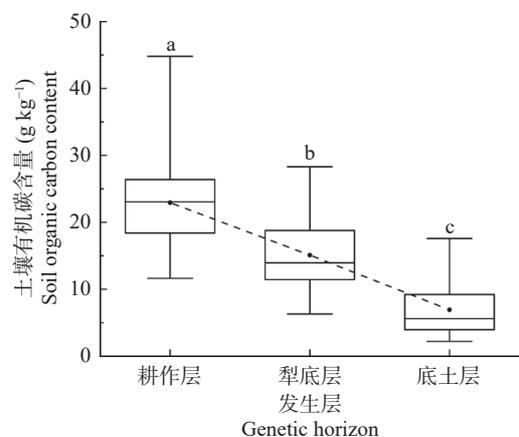
将 58 个水稻土剖面各发生层土壤有机碳含量按土层厚度进行加权平均,得到各剖面样点的平均土壤有机碳含量,结果表明,湖南省水稻土剖面有机碳平均含量为 9.30 g kg^{-1} 。

不同发生层次土壤有机碳含量分布特征见图 2。不同发生层土壤有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$),土壤有机碳的平均含量为耕作层 (22.94 g kg^{-1}) > 犁底层 (15.09 g kg^{-1}) > 底土层 (6.93 g kg^{-1}),土壤有机碳含量呈现随发生层次加深而逐渐减小的趋势,耕作层到犁底层和犁底层到底土层间土壤有机碳平均含量下降幅度分别为 34.20% 和 54.08%,各土层土壤有机碳含量均为中等程度变异,且随着土层加深变异系数增加。

2.2 不同母质类型水稻土的有机碳垂直分布特征

6 种不同成土母质发育的水稻土有机碳含量均随剖面层次加深而减小(图 3),耕作层有机碳含量显著高于犁底层和底土层,呈现明显的表聚性。不同成土母质类型发育的水稻土的有机碳含量在各发生

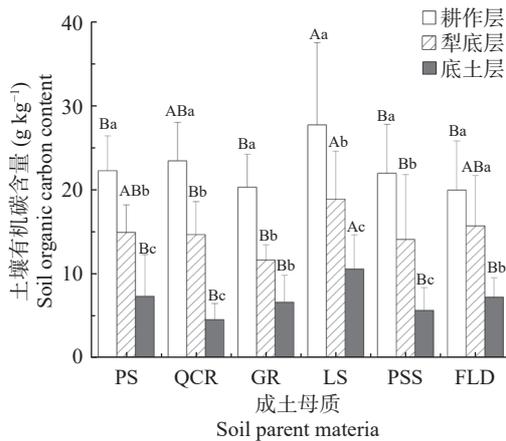
层次存在一定差异,其中耕作层中,石灰岩风化物最高,为 27.73 g kg^{-1} ,河湖沉积物相对最低,为 19.95 g kg^{-1} ;犁底层中,石灰岩风化物最高,为 18.87 g kg^{-1} ,花岗岩风化物相对最低,为 11.59 g kg^{-1} 。底土层中,石灰岩风化物最高,为 10.51 g kg^{-1} ,第四纪红色黏土发育的水稻土相对最低,为 4.47 g kg^{-1} 。



注:不同小写字母表示不同发生层有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$); 盒中横线和黑点分别代表中位数和均值,顶部和下面的条形图分别是最大值和最小值。

图 2 不同发生层土壤有机碳含量

Fig.2 Soil organic carbon content at different genetic horizons



注:LS: 石灰岩风化物; QCR: 第四纪红色黏土; PS: 板页岩风化物; PSS: 紫色砂页岩风化物; GR: 花岗岩风化物; FLD: 河湖沉积物; 不同大写字母表示同一发生层不同母质类型之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一母质类型不同发生层之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 不同成土母质水稻土各发生层有机碳含量

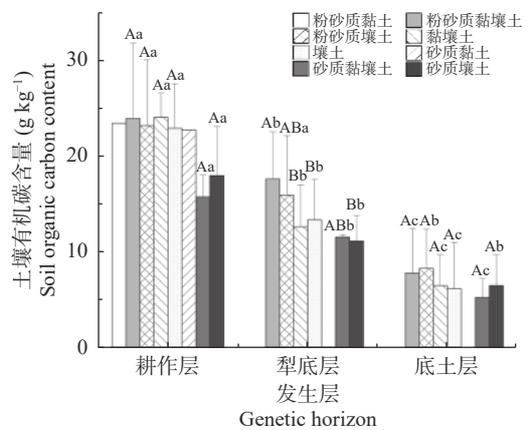
Fig.3 Effects of soil parent material and genetic horizon on soil organic carbon

不同母质发育的水稻土的平均有机碳含量呈现: 石灰岩风化物 > 板页岩风化物 > 河湖沉积物 > 花岗岩风化物 > 紫色砂页岩风化物 > 第四纪红色黏土。各成土母质发育的水稻土其耕作层与犁底层、底土层有机碳含量均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。其中板页岩风化物发育的水稻土, 从耕作层向下, 有机碳含量从 22.25 g kg^{-1} 下降至 7.26 g kg^{-1} ; 而第四纪红色黏土发育的水稻土, 有机碳含量从耕作层的 23.44 g kg^{-1} 下降到底土层的 4.47 g kg^{-1} , 下降幅度高于其他成土母质; 花岗岩风化物发育的水稻土, 有机碳含量从耕作层的 20.28 g kg^{-1} 下降至底土层的 6.55 g kg^{-1} ; 石灰岩风化物发育的水稻土, 耕作层有机碳含量为 27.73 g kg^{-1} , 到底土层下降至 10.51 g kg^{-1} ; 紫色砂页岩发育的水稻土, 有机碳含量从耕作层的 21.94 g kg^{-1} 下降至底土层的 5.58 g kg^{-1} ; 河湖沉积物发育的水稻土, 随剖面层次加深, 从耕作层的 19.95 g kg^{-1} 下降至底土层的 7.16 g kg^{-1} , 整体下降幅度相对最小。

2.3 不同质地水稻土有机碳垂直分布特征

不同土壤质地水稻土各发生层的有机碳含量存在一定差异 (图4)。耕作层土壤中, 粉砂质黏土和砂质黏土样本仅各有1个, 分别为 23.51 g kg^{-1} 和 22.80 g kg^{-1} 。耕作层其他6种土壤质地有机碳含量排序为: 黏壤土 > 粉砂质黏壤土 > 粉砂质壤土 > 壤土 > 砂质壤土 > 砂质黏壤土, 耕作层土壤质地为黏

壤土的水稻土有机碳平均含量最高, 为 24.12 g kg^{-1} , 粉砂质黏壤土次之, 为 24.01 g kg^{-1} ; 犁底层6种土壤质地水稻土有机碳含量差异显著 ($P < 0.05$), 具体排列顺序为: 粉砂质黏壤土 > 粉砂质壤土 > 壤土 > 黏壤土 > 砂质黏壤土 > 砂质壤土, 粉砂质黏壤土质地有机碳含量最高, 为 17.67 g kg^{-1} ; 底土层中, 各质地水稻土有机碳含量大小为: 粉砂质壤土 > 粉砂质黏壤土 > 砂质壤土 > 黏壤土 > 壤土 > 砂质黏壤土。大体上, 各发生层次不同质地土壤呈现出粉粒含量占比越高, 其有机碳含量越高的趋势。



注:不同小写字母表示同一质地不同发生层有机碳含量差异显著, 不同大写字母表示同一发生层不同质地差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同质地水稻土各发生层有机碳含量

Fig.4 Effects of soil texture and genetic horizon on soil organic carbon

2.4 湖南省水稻土有机碳空间分布特征

利用普通克里金方法对不同发生层水稻土有机碳含量进行空间插值, 得到湖南省水稻土不同发生层次有机碳含量的空间分布特征 (图5)。结果表明耕作层、犁底层和底土层土壤有机碳含量空间分布格局基本一致, 大体上均呈现西南高, 东北低的空间分布格局。耕作层和犁底层有机碳含量在空间上分布具有较高的非均质性, 底土层土壤有机碳含量整体分布上差异较小。

2.5 基于地理探测器的土壤有机碳影响因素分析

利用地理探测器中的因子探测器探测成土母质、坡度、坡向、高程和土壤容重、砂粒、粉粒和黏粒含量对湖南省水稻土各发生层次有机碳含量的影响 (表2)。因子探测器分析结果显示, 不同发生层土壤有机碳含量的影响因子存在一定差异: 容重对各发生层有机碳含量空间分布的解释能力最强, 在各发生层表现为: 耕作层 (0.24)、犁底层 (0.39)、

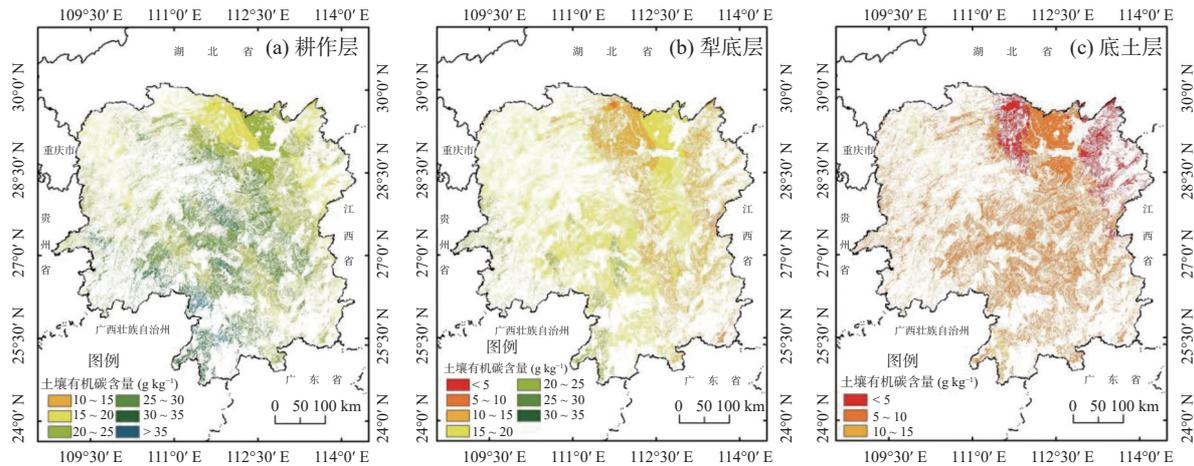


图 5 湖南省不同土层水稻土有机碳含量空间分布
Fig.5 Spatial distribution of soil organic carbon of different genetic horizon

表 2 有机碳含量影响因素因子探测结果
Table 2 Influencing factors and detection results of soil organic carbon

发生层 Genetic horizon	成土母质 Soil parent material	容重 Bulk density	坡度 Slope	坡向 Aspect	高程 Elevation	砂粒 Sandy	粉粒 Silt	黏粒 Clay
耕作层	0.17	0.24***	0.03	0.08	0.03	0.11	0.09	0.05
犁底层	0.17	0.39***	0.03	0.08	0.10	0.16*	0.19*	0.08
底土层	0.27**	0.37***	0.04	0.15	0.22	0.18*	0.13	0.04

注：***表示显著性检验 $P < 0.01$ ，**表示显著性检验 $P < 0.05$ ，*表示显著性检验 $P < 0.1$ 。

底土层 (0.37)，且均通过 1% 显著性检验，表明容重是影响土壤有机碳空间分布格局的主要驱动因子。耕作层其它影响因子均未通过显著性检验，说明是解释耕作层有机碳含量空间分布的次要因素。犁底层中，除容重外，母质 (0.17)、粉粒 (0.19) 和砂粒 (0.16) 对有机碳含量空间分异的解释程度较高， q 均值 > 0.1 。底土层中，母质 (0.27) 和砂粒 (0.18) 的解释力仅次于容重 (0.37)。

利用地理探测器中的交互作用探测器分析水稻土各发生层有机碳影响因子的交互关系 (图 6)。结果显示，任何两个影响因子的交互作用对土壤有机碳含量影响的解释程度均大于单个因子的解释程度，表现为非线性增强或双因子增强。耕作层中，坡向

黏粒 (0.63) 和容重∩母质 (0.59) 解释力最强；犁底层中，容重∩母质 (0.65) 和容重∩粉粒 (0.57) 解释力最强；底土层中，容重∩母质 (0.60) 和容重∩高程 (0.59) 解释力最强。综合各发生层土壤有机碳影响因子交互作用来看，容重对水稻土有机碳具有较好的解释能力，且与其他因子交互后贡献程度显著增强，说明容重是影响水稻土有机碳空间分异的关键因子。

3 讨论

3.1 湖南省水稻土有机碳剖面分异的影响因素

研究结果显示湖南省水稻土有机碳含量在耕作层最高，剖面上呈现随深度增加而递减，这一结果

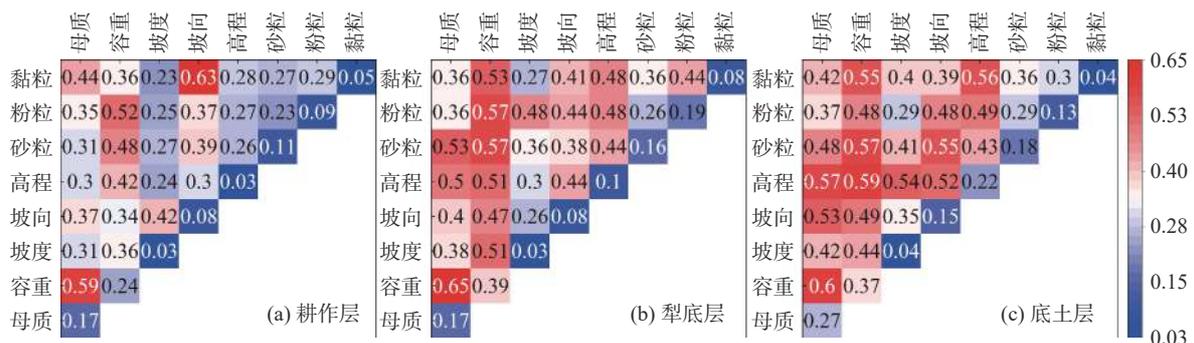


图 6 交互探测结果
Fig.6 Interaction detection results

与李珊对成都平原区水稻土有机碳剖面分布的研究结果类似^[9], 与刘飞对全国水稻土有机碳^[14]的研究保持一致。这可能是因为水稻土表层植物根系分布较多, 微生物分解效率高, 有利于表层有机碳的积累, 以及水稻土是主要人为耕作土壤, 很大程度上受到施肥和耕作的影响, 使得表层土壤有机碳相对丰富; 犁底层在一定程度上阻碍了土壤有机质的随水下渗, 随着剖面深度加深, 有机碳输入量减少, 导致底土层有机碳含量显著低于耕作层和犁底层。研究得到湖南省水稻土耕作层有机碳含量均值为 22.94 g kg^{-1} , 是全国耕作层有机碳含量均值的 1.6 倍^[22], 表明湖南省水稻土具有较高的有机碳含量。可能是湖南省水稻土种植面积大且水稻土长期处于耕作状态, 稻田长期淹水, 厌氧环境下, 土壤有机质的矿化及分解会受到抑制, 有利于土壤有机碳的富集^[23]。

成土母质和质地是决定土壤性质的关键因素, 从不同母质和质地角度进行有机碳分析, 可以直观揭示水稻土有机碳在发生层上的分布特性。不同母质发育的水稻土其有机碳含量在剖面上均表现为从表层到深层逐渐降低。各发生层有机碳含量均以石灰岩风化物最高, 可能与石灰岩发育的土壤质地较为黏重、透水能力差, 且含钙质较高、凝聚性强、保水保肥能力强有关^[24]。本研究发现不同质地水稻土有机碳含量大体上呈随粉粒含量占比增加而升高的变化趋势, 这与胡洁莹^[11]对北京平原区土壤有机碳垂直分布的研究结果类似。

3.2 湖南省水稻土有机碳空间分异的影响因素

湖南省水稻土各发生层有机碳含量在空间分布上均呈现西南高、东北低的格局, 其中耕作层, 有机碳含量高值主要出现在西南方的永州市和邵阳市以及中部的娄底市; 从犁底层来看, 有机碳高值集中于西南部的永州、邵阳和怀化市; 对底土层而言, 高值集聚在湘西州、怀化市和永州市。出现这种分布格局, 一部分原因是受到湖南省地势南高北低、东西高而中部低的影响, 高海拔和相对湿润的气候使得土壤中微生物分解和腐殖质转化效率较慢, 有利于有机碳含量积累; 另一部分原因与湖南省成土母质分布相关, 西南部的永州、邵阳市的水稻土多由石灰岩风化物发育而来, 质地相对黏重, 有利于有机碳积累, 这与本研究对不同母质有机碳含量的研究结果相吻合; 还有可能是本研究使用的数据是来源于湖南省土系调查项目, 剖面样点的布设是从

土壤分类角度出发的, 样点选择具有一定目的性。

土壤有机碳的空间分布格局受到多种因素共同控制, 利用地理探测器分析水稻土有机碳垂直空间分异的影响因素, 研究结果表明土壤容重对湖南省水稻土有机碳含量空间分异解释能力最高, 可能是因为土壤容重反映了土壤的孔隙度和松紧度大小, 并且直接影响土壤水、肥、气、热之间的协调作用。一般认为, 土壤容重随土层深度的增加而增大, 有机碳含量随土壤深度的增加而减少, 两者具有良好的相互作用关系。吴燕飞等^[25]对贵州施秉云台山地区典型剖面土壤进行研究时, 发现土壤有机碳与土壤容重有着明显的线性负相关关系。郭月峰等^[26]对梯田土壤进行研究时发现容重大的土壤孔隙度较小, 作物水肥利用差而生长不良, 导致外源有机物质补充较少, 所以土壤有机碳含量随土壤容重的增大而减少。已有诸多学者在对农田^[27]、草地^[28]、森林^[29]、泥岩沼泽^[30]等各类土壤研究时发现土壤容重与有机碳含量密切相关, 这与本研究结果相一致。在水稻土上, 土壤容重通过影响土壤的通透性, 进而影响根系的生长和分布, 一定范围内土壤容重减少, 可以提高水稻根系生长量及地上生物量, 导致有机碳来源增加, 有机碳含量提高。有报道地形因子对土壤有机碳含量贡献率最高^[31], 而本研究表明地形因子 (DEM、坡度、坡向) 对湖南省水稻土有机碳的空间分异解释程度较低。原因可能是湖南省虽地貌多样, 但是水稻土多分布在地势相对平坦的丘陵和平原地区, 加上剖面野外采样的局限性, 地形因子对水稻有机碳空间分异的影响相对被削弱。以往研究一般认为, 土壤有机碳含量会随黏粒含量增加而增多, 黏粒含量能增加土壤水分的蓄持能力及对土壤有机碳有一定吸附作用^[10,32]。这是因为黏粒对土壤有机碳具有保护作用, 黏土成分较高时, 土壤碳稳定性增加^[33]。地理探测器结果显示, 砂粒和粉粒含量对各发生层有机碳含量的解释程度大于黏粒, 这与马渝欣^[34]对皖北平原蒙城县农田土壤有机碳的研究结果类似。

水稻土是在淹水条件下, 经长期人为活动和自然因素双重作用形成的特殊土壤, 其有机碳含量不仅受到自然因素的影响, 很大程度上还会受到施肥、秸秆还田、耕作等人为管理的影响。有研究认为有机无机肥配施可显著提高水稻土有机碳含量^[35-36]。施用化肥主要通过增加作物产量和作物残茬量, 以及

促进根系分泌及根的周转来提高土壤有机碳的输入量^[37]。水稻秸秆和根系的大量累积也是水稻土外源有机碳输入的重要来源,李欢等^[38]研究发现水稻秸秆与根系还田能有效增加稻田红壤有机碳;马力等^[39]研究表明化肥配施秸秆处理更有利于水稻土有机碳的提升。不同耕作方式下,因水稻土的秸秆还田量和施肥量存在差异,从而也会引起有机碳含量的变化。徐胜祥等^[40]模拟估算不同耕作方式下土壤固碳潜力发现,改变传统耕作方式并结合秸秆还田是提升土壤有机碳含量最有效的措施。本研究因没有对人为管理做深入调查,缺少施肥、秸秆还田、耕作等相关数据,未能探讨人为管理对水稻土有机碳的影响,后续对水稻土有机碳的研究中,应当从自然因素和人为管理因素相结合的角度进一步探讨有机碳分布的影响因素。

水稻土有机碳含量与影响因子之间的关系复杂,单个影响因子对有机碳含量的解释能力相对较弱,而因子两两交互之后,解释能力得到了很大程度上的增强,说明水稻土有机碳含量的空间分异性不是由单独某一个因子所决定,而是由多因子相互作用控制^[41-42]。因此后续对水稻土有机碳研究时,不仅要考虑容重因子主导因素的影响,还要考虑多因子之间的交互作用对水稻土空间分异的影响,从而为水稻土质量提升、水稻增产等提供理论支撑。

4 结论

(1) 湖南省水稻土剖面有机碳平均含量为 9.30 g kg⁻¹, 总体水平较高。水稻土有机碳含量随剖面层次加深呈下降趋势,在发生层上表现为耕作层 > 犁底层 > 底土层。

(2) 不同母质和质地水稻土有机碳含量均呈现随剖面层次加深而减少的趋势,其中不同成土母质发育的水稻土剖面各发生层有机碳含量均以石灰岩风化物最高;不同质地各发生层有机碳含量大致随粉粒含量增加而增加。

(3) 湖南省水稻土各发生层有机碳含量在空间分布上均呈现西南高,东北低的格局。

(4) 因子探测器识别结果显示不同发生层影响土壤有机碳含量空间分异的因素存在一定差异,容重对水稻土各发生层有机碳含量空间分异性的解释程度最高;交互探测器结果表明水稻土有机碳的空间分异性是由多因子综合作用形成的,各影响因子

之间两两交互影响大于单因子作用。综合因子探测器和交互探测器结果,容重是影响湖南省水稻土有机碳含量空间分布最显著且解释能力最高的因子。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1 - 15.
- [2] 周黎, 冯伟, 易军, 等. 江汉平原典型农业灌排单元土壤有机碳密度分布特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 213 - 221.
- [3] Ren W, Banger K, Tao B, et al. Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901-2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and Management[J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 59 - 69.
- [4] 廖丹, 于东升, 赵永存, 等. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 517 - 527.
- [5] 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, 45(5): 901 - 914.
- [6] Yang R M, Zhang G L, Yang F, et al. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1 - 10.
- [7] Aldana Jague E, Sommer M, Saby N P A, et al. High resolution characterization of the soil organic carbon depth profile in a soil landscape affected by Erosion[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 185 - 193.
- [8] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 408 - 421.
- [9] 李珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3365 - 3372.
- [10] 杨敏, 杨飞, 杨仁敏, 等. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2017, 49(2): 386 - 392.
- [11] 胡莹洁, 孔祥斌, 姚静韬. 北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 561 - 570.
- [12] 薄会娟, 董晓华, 郭梁锋, 等. 湖北省土壤有机碳垂直分布及储量估算[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 290 - 296.
- [13] 陈仕栋, 方晰. 湖南省土壤有机碳库及其空间分布格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 146 - 151 + 160.
- [14] 刘飞, 杨柯, 李括, 等. 我国四种典型土类有机碳剖面分布特征[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 20 - 26.
- [15] 宋佳龄, 盛浩, 张亮, 等. 湘东地区水耕人为土的碳氮磷化学计量学特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(3): 9 - 16.
- [16] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China)[J]. *Geoderma*, 2014, 228-229(1): 67 - 89.
- [17] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797 - 802.
- [18] 史军, 刘纪远, 高志强, 等. 造林对土壤碳储量影响的研究[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 410 - 416.
- [19] 郑琳, 韩晓增, 郝翔翔, 等. 取样和计算方法对黑土剖面土壤

- 有机碳密度的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2583 - 2589.
- [20] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled Soils[J]. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 161 - 193.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116 - 134.
- [22] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047 - 1056.
- [23] Pan G, Li L, Wu L, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy Soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10(1): 79 - 92.
- [24] 刘珂, 李明阳, 李灵, 等. 南水北调中线工程水源地土壤有机碳密度空间分异及驱动因素研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 35 - 43.
- [25] 吴燕飞, 季宏兵, 褚华硕, 等. 黔东南施秉白云岩上覆土壤剖面理化特征与土壤有机碳含量关系研究[J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 267 - 276.
- [26] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 等. 小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 748 - 756.
- [27] Li M, Han X, Du S, et al. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China[J]. *CATENA*, 2019, 174: 285 - 292.
- [28] Zhang W, Zhang H. Distribution characteristics of soil organic carbon of alpine meadow in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2009, 14(3): 274 - 280.
- [29] 陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 等. 秦岭太白山森林表层土壤有机碳分布特征[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(3): 244 - 252.
- [30] 陈良帅, 黄新亚, 薛丹, 等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 267 - 275.
- [31] 张祎, 李鹏, 肖列, 等. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1140 - 1150.
- [32] 宋娅丽, 康峰峰, 韩海荣, 等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. 世界林业研究, 2015, 28(3): 6 - 12.
- [33] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(3): 142 - 150.
- [34] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1153 - 1159.
- [35] 李艳, 陈义, 唐旭, 等. 长期不同施肥模式下南方水稻土有机碳的平衡特征[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(12): 2094 - 2101.
- [36] 禹洪双, 刘勤, 陈武荣, 等. 长期不同施肥处理水稻土溶解性有机碳降解特性研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 338 - 342.
- [37] 谢丽华, 廖超林, 李清美, 等. 有机肥增减施后红壤水稻土团聚体有机碳的变化特征[J]. *土壤*, 2019, 51(6): 1106 - 1113.
- [38] 李欢, 王艳玲, 殷丹, 等. 水稻秸秆/根系添加对稻田红壤发生层颗粒态及矿物结合态有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 384 - 391.
- [39] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 883 - 890.
- [40] 徐胜祥, 史学正, 赵永存, 等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 253 - 259.
- [41] 丁倩, 张弛. 基于地理探测器的中国陆地生态系统土壤有机碳空间异质性影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 19 - 28.
- [42] 李理, 朱文博, 刘俊杰, 等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 687 - 695.

Profile Distribution Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Hunan Province

SHEN Xuan-yang¹, DUAN Liang-xia¹, OUYANG Ning-xiang², SHENG Hao¹, YUAN Hong¹,
ZHANG Liang¹, ZHANG Yang-zhu¹, ZHOU Qing¹, XIE Hong-xia^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410000, China; 2. College of Engineering Management, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) in paddy soil profile and its influencing factors according to the genetic horizon. [Method] By measuring SOC content in each occurrence layer of 58 paddy soil profiles in Hunan Province, the SOC distribution characteristics in the occurrence layer of paddy soil profiles were determined, and to further identify the factors influencing the spatial variation. [Result] ①The average SOC content in the entire paddy soil profile was 9.30 g kg^{-1} , in the genetic horizon, the cultivated horizon had the greatest content, with the average of 22.94 g kg^{-1} , followed by plow pan and subsoil layer, with the averages of 15.09 g kg^{-1} and 6.93 g kg^{-1} . ②Among the different soil parent material, the paddy soil developed from the weathering product of limestone had the largest SOC in each generation layer. For different textures, the overall performance of SOC in each genetic horizon increased with an increase in proportion of silt. ③Kriging interpolation analysis indicated that the SOC of each genetic horizon had high and low values in the southwest and low in the northeast, respectively. ④Geographic detector showed that the soil bulk density generally exhibited the greatest explanatory power in each genetic horizon. Furthermore, the interaction forces between the soil bulk density and other factors were clearly strengthened. [Conclusion] Significant differences in SOC content in paddy soils at each genetic horizon of the profile. The spatial distribution of SOC in paddy soils is shaped by the interaction of multiple factors, and bulk density showed the most significant explanatory power for the SOC in genetic horizon.

Key words: Soil organic carbon; Genetic horizon; Soil parent material; Soil texture; Geographic detector

[责任编辑: 韩春兰]