



福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析

程金, 黄文卿, 张世昌, 张卫清, 黄功标, 张江周, 吴良泉

引用本文:

程金, 黄文卿, 张世昌, 张卫清, 黄功标, 张江周, 吴良泉. 福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(4): 805–816.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0551>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分层多元复合模型的广东省农田土壤有机碳高精度制图

任向宁, 王璐, 林赋英, 陈淑莹, 胡月明

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 967–979 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0504>

基于机器学习的江汉平原土壤有机碳预测及制图

沈佳丽, 陈颂超, 胡碧峰, 李硕

农业资源与环境学报. 2023, 40(3): 644–650 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0583>

秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响

李玉梅, 王根林, 孟祥海, 胡颖慧, 王伟, 李建英, 张冬梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 268–276 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0154>

盐碱地土壤养分的空间变异及合理取样密度研究

张华杰, 陈为峰, 宋富贵, 李晓, 周虎

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 120–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0255>

山东“蓝黄”两区耕层土壤有机质的时空分异特征

李因帅, 赵庚星, 李涛, 李建伟, 窦家聪, 范瑞彬

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 891–899 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0572>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程金, 黄文卿, 张世昌, 等. 福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 805–816.
CHENG J, HUANG W Q, ZHANG S C, et al. Spatial distribution and influencing factors of topsoil organic carbon density in Fujian Province, China[J].
Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(4): 805–816.

福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析

程金¹, 黄文卿¹, 张世昌², 张卫清², 黄功标², 张江周^{1*}, 吴良泉¹

(1. 福建农林大学资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福州 350002; 2. 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003)

摘要:为准确估算福建省表层土壤有机碳密度, 确定其空间分布和影响因素, 基于2016—2019年采集的4 350个表层土壤样本, 利用地统计学方法与ArcGIS技术分析土壤有机碳密度空间分布, 并通过随机森林模型分析影响土壤有机碳密度的重要因素。结果表明:福建省表层土壤有机碳密度范围为0.03~14.68 kg·m⁻², 平均值为4.06 kg·m⁻²。全省表层土壤有机碳密度在空间上聚集分布, 具有中等程度空间自相关性, 空间变异主要由结构性因素主导, 呈现自南向北、从沿海向内陆山地逐渐升高的空间分布格局。降雨量、海拔、土壤质地和土壤pH是影响有机碳储量的主要因素, 地貌类型、土壤类型和作物类型影响相对较弱, 且随着化肥(磷肥和钾肥)施用量的增加, 表层土壤有机碳密度显著降低。研究表明, 福建省表层土壤有机碳密度不高, 空间分布聚集, 自然气候变化、地形因子和人类活动都会影响土壤有机碳密度, 其中降雨量、海拔、土壤质地和土壤pH为主导因素。

关键词:土壤有机碳密度; 空间分布; 驱动因子; 随机森林模型

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)04-0805-12

doi: 10.13254/j.jare.2022.0551

Spatial distribution and influencing factors of topsoil organic carbon density in Fujian Province, China

CHENG Jin¹, HUANG Wenqing¹, ZHANG Shichang², ZHANG Weiqing², HUANG Gongbiao², ZHANG Jiangzhou^{1*}, WU Liangquan¹

(1. College of Resources and Environment/International Magnesium Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Farmland Construction and Soil Fertilizer Technology Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: This study aimed to accurately estimate the organic carbon density of topsoil in Fujian Province and determine the spatial distribution and influencing factors of topsoil organic carbon density. Using 4 350 topsoil samples collected from 2016 to 2019, the spatial distribution of organic carbon density was analyzed by geostatistics and ArcGIS, and the influencing factors of soil organic carbon density were analyzed using a random forest model. The topsoil organic carbon density was 4.06 kg·m⁻² (range, 0.03–14.68 kg·m⁻²). The topsoil organic carbon density was spatially concentrated and distributed with a moderate degree of spatial autocorrelation. The spatial variation was mainly dominated by structural factors, showing a spatial distribution pattern that gradually increased from south to north, from coastal to mountainous areas. Precipitation, altitude, soil texture, and pH were the main factors affecting the organic carbon density. Landform type, soil type, and crop type exerted relatively weak effects, and the soil organic carbon density reduced significantly with the increase in chemical fertilizer (phosphorus and potassium) application. These results showed that the topsoil organic carbon density in Fujian Province is not high, and the spatial distribution is concentrated. Natural climate change, terrain factors, and human activities all affect the soil organic carbon storage level, with precipitation, altitude, soil texture, and pH being the dominant influencing factors.

Keywords: soil organic carbon density; spatial distribution; influencing factor; random forest model

收稿日期: 2022-08-15 录用日期: 2022-11-14

作者简介: 程金(1996—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 从事土壤健康评价与酸化土壤调控研究。E-mail: cx326626@163.com

*通信作者: 张江周 E-mail: jzhang@fafu.edu.cn

基金项目: 福建农林大学国际镁营养研究所开放基金项目(IMI2021-02); 国家自然科学基金项目(31501832); 中国工程院合作项目(2020-FJ-XZ-8)

Project supported: The International Magnesium Institute Program of the Fujian Agriculture and Forestry University (IMI2021-02); The National Natural Science Foundation of China(31501832); Joint Project of Chinese Academy of Engineering(2020-FJ-XZ-8)

土壤有机碳作为陆地生态系统碳库的重要组成部分,不仅影响农田生态系统的生产力,而且对地球碳循环与全球气候变化有着巨大影响,既是温室气体的“源”,也是其重要的“汇”^[1]。研究表明,全球1 m深土壤碳库储量高达1 500 Gt,是大气碳库(750 Gt)的2倍,土壤每年向大气中释放的CO₂是化石燃料的10倍^[2]。因此,即使土壤有机碳储量发生轻微变化,也会对全球气候产生严重影响。据估计,土壤碳库变化0.10%,就会显著影响大气中CO₂浓度^[3]。同时,土壤有机碳储量影响作物产量及土壤健康^[4-5]。有研究表明,在一定范围内,土壤有机碳含量增加可以有效缓解土壤酸化对作物产量的影响,使作物增产50%以上^[6]。此外,有机碳在提升土壤保肥能力、促进土壤微生物活动及维持土壤生物多样性、改善土壤健康状况等方面发挥着关键作用^[7-8]。然而土壤有机碳储量受自然因素、人为因素等诸多因素的影响,因此,明确土壤有机碳储量及其影响因素对指导农业可持续发展和缓解全球气候变暖、实现“双碳”目标具有重要意义。

土壤有机碳密度直接影响土壤有机碳储量,而土壤有机碳密度及分布受多种因素影响,如气候、海拔、地形、植被、母质和人类利用方式^[9-10]。Vos等^[11]利用2 515个土壤样本通过土壤类型法估算出德国土壤有机碳密度为10.30 kg·m⁻²,土地利用方式、黏粒含量、电导率是表层土壤碳密度的主要影响因子,而气候对碳密度影响甚微。Reyna-bowen等^[10]对波兰巴比亚国家公园土壤有机碳储量的研究表明,土壤类型是影响有机碳密度的重要因素,地形通过影响土壤性质和植被间接影响有机碳密度。Sun等^[12]利用8 637个土壤样本估算出云南省表层土壤有机碳密度约为4.84 kg·m⁻²,海拔、温度、降雨量和地形湿度指数是影响云南省土壤有机碳密度空间变异的主要因子。张勇等^[13]利用798个土壤剖面估算出云南、贵州和广西地区土壤有机碳密度为5.62 kg·m⁻²,环境因子(海拔、经纬度、气温和降雨量)显著影响有机碳储量,而海拔是影响有机碳储量的主要因子。于沙沙等^[14]对吉林省耕地土壤有机碳密度的研究表明,有机碳密度与降雨量、土壤阳离子交换量呈显著正相关关系,与pH呈显著负相关关系。此外,土地利用方式和田间管理模式也会影响土壤碳密度^[15]。

福建省山多地少,地形复杂,森林覆盖率居全国首位,是中国有机碳密度较高的地区之一。气候变化、地理位置、植被覆盖类型、土地利用方式、施肥量等自然与人为活动都会对土壤有机碳储量产生较大

影响^[16]。王义祥等^[17]基于第二次土壤普查数据,并结合《福建土种志》和《福建土壤》估算出福建省有机碳总储量为1.58 Pg,有机碳密度为14.50 kg·m⁻²;王文俊^[18]基于多目标区域地球化学调查所获得的数据,估算得到福建省0~20 cm有机碳储量为427.50 Mt,有机碳密度为3.45 kg·m⁻²;陈中星等^[19]利用第二次全国土壤普查和《福建土种志》相关数据,研究不同比例尺下福建省土壤有机碳储量,结果表明,小比例尺下表层土壤有机碳储量为552 Tg,有机碳密度为4.57 kg·m⁻²。然而,目前福建省土壤有机碳密度的研究多基于第二次土壤普查数据,其数据距今已有40余年,且针对表层有机碳密度影响因素的研究鲜见报道。随着福建省农业生产的不断发展及政策变化,准确评估福建省土壤有机碳密度并探究其影响因素意义重大。因此,本研究利用福建省农田建设与土壤肥料技术总站于2016—2019年采集的4 350个表层土壤样点,探究土壤有机碳密度的空间分布及其影响因素,以期对福建省土地可持续利用与土壤固碳减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以福建省表层土壤为研究对象,福建省(23°30'~28°20'N,115°50'~120°40'E)位于我国东南沿岸,常年高温多雨,属典型亚热带季风气候,平均气温17~21℃,年平均降雨量1 400~2 000 mm。福建省山多地少,土地总面积1.208×10⁷ hm²,耕地面积仅为1.340×10⁶ hm²,主要以丘陵和山地为主,平原与盆地较少。土壤类型多样,根据全国第二次土壤普查结果,福建省代表性土壤类型是红壤和水稻土,其中63.40%为红壤,面积达到7.66×10⁶ hm²,其次为水稻土,面积为1.07×10⁶ hm²,赤红壤、紫色土、潮土、滨海盐土、风沙土等也有分布^[20]。

1.2 数据来源

本研究数据来源于福建省农田建设与土壤肥料技术总站,土壤样品采集于2016—2019年。采用五点取样法,采集0~20 cm耕层土壤,五个样点混合成一个样品,共获得土壤样品4 350份(图1)。土壤样品采集后迅速运到实验室,记录直径大于2 mm石砾的质量,剔除根茬等杂物后风干,过100目筛,用于测定土壤有机碳含量。在样品采集过程中详细记录海拔、降雨量、土壤质地、土壤类型及作物类型等基本数据。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量,环刀法测定土壤容重。区域养分(N、P₂O₅和K₂O)投入

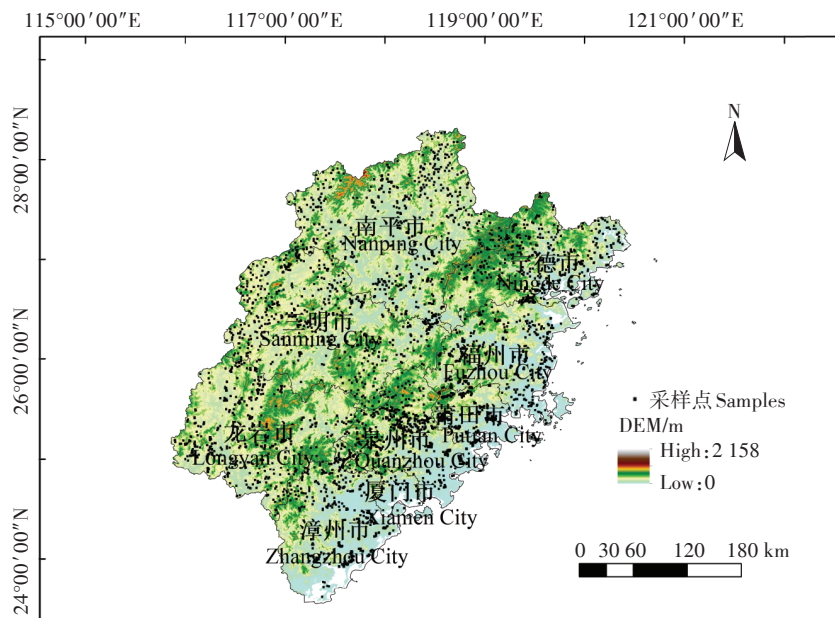


图1 福建省表层土壤有机碳密度采样点空间分布

Figure 1 Distribution of topsoil organic carbon density sampling points in Fujian Province

量以市为单元,通过查阅《福建统计年鉴》获得。

1.3 数据计算与统计分析

1.3.1 土壤有机碳密度计算方法

福建省表层土壤有机碳密度计算公式^[21-22]为:

$$D_{\text{SOC}} = C \times \theta \times D \times (1 - \delta) / 100 \quad (1)$$

式中: D_{SOC} 代表土壤有机碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C 表示土壤有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; θ 表示土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; D 为土层厚度, cm ; δ 为直径大于2 mm的砾石含量,%。

1.3.2 空间自相关分析

全局 Moran's I 指数用以检验变量之间是否存在依赖关系,可从全局尺度上对变量是否存在空间自相关性进行分析。本研究通过全局 Moran's I 指数衡量福建省表层土壤有机碳密度的聚集特征,取值范围为 $[-1, 1]$,取值为正表示要素呈聚集分布;取值为负表示要素呈分散分布;趋近于0则偏向于随机分布,绝对值越大,相关程度越高。在分析全局 Moran's I 指数时通常将 I 标准化为 Z ,用于判断相关性显著程度,当 $|Z| > 1.96$ 时,具有显著自相关关系,反之则无自相关性^[23]。全局 Moran's I 指数计算公式^[24]如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为位置 i 处和 j 处的实测值; \bar{x} 是平均值; w_{ij} 是空间权重; n 是样本量。

1.3.3 半变异函数

半变异函数是地学统计中用于描述区域化土壤要素空间变异性的重要函数,可量化结构性因素和随机性因素对变量分异的影响。本研究选取半变异函数表征福建省表层土壤有机碳密度的空间变异结构,参照半变异函数理论模型的选取标准,一般认为,块基比反映系统变量的空间自相关性程度,当比值 $< 25\%$,说明变量具有强烈空间相关性,有较好的空间结构性;当比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间,表明变量具有中等强度空间相关性,变量间变异主要由结构性因素主导;当比值 $> 75\%$,则表明变量空间自相关性很弱,变量间变异更多由随机性因素引起^[25]。半变异函数计算公式^[26]如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

式中: $\gamma(h)$ 是间距为 h 时的半方差; $N(h)$ 表示以 h 为间距时样本点对总数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别表示变量在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。

1.3.4 数据统计分析

利用 IBM SPSS Statistics 26.0 分析不同海拔、降雨量、土壤质地、土壤类型及作物类型的有机碳密度差异,用 Duncan 法检验处理间差异($P < 0.05$)。全局自相关分析在 Geoda 1.14 中完成,半变异函数模型分析通过 GS+9.0 实现。采用随机森林模型(R 中“Random Forest”包)分析不同因素对土壤有机碳密度

影响的重要性,各因素的差异性检验采用“A3”包进行。利用 ArcGIS 10.8 中地学统计分析工具,计算并预测福建省土壤有机碳密度空间分布图。各因素与表层土壤有机碳密度的相关分析采用 Origin 2022 制图。

2 结果与分析

2.1 福建省表层土壤有机碳密度空间变异与分布特征

2.1.1 全局空间自相关分析

对福建省表层土壤有机碳密度进行空间自相关分析(图2)发现,土壤有机碳密度的全局 Moran's *I* 指数为 0.331,说明土壤有机碳密度具有空间正相关性,即某一区域土壤有机碳密度值的高低对周围有机碳密度的值存在正向影响。 $|Z|$ 值为 33.34,大于 1.96,对应概率 *P* 值为 0.001,说明土壤有机碳密度存在显著的空间聚集性。

2.1.2 半变异函数分析

对比分析表 1 中各模型残差(RSS)、决定系数

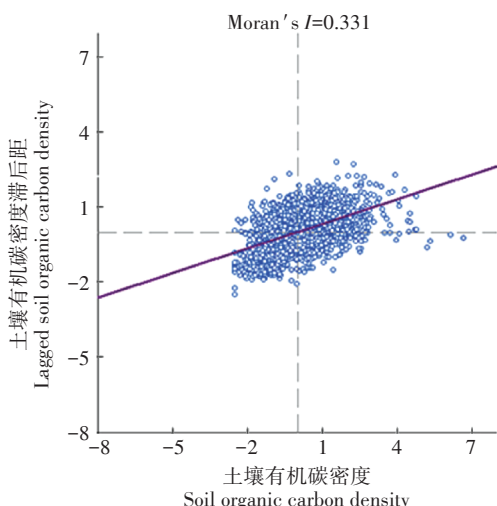


图2 土壤有机碳密度的空间自相关特征

Figure 2 Spatial autocorrelation characteristics of soil organic carbon density

表 1 福建省表层土壤有机碳密度的半变异函数模型及参数
Table 1 Semi-variance model and parameters of topsoil organic carbon density in Fujian Province

模型 Model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	变程 Range (A)/m	块基比 $[C_0/(C_0+C)]/\%$	残差 RSS	决定系数 R^2
高斯模型	0.13	0.33	15.30	40.30	0.04	0.61
指数模型	0.11	0.54	64.92	20.00	0.03	0.57
线性模型	0.11	0.30	11.74	39.05	0.03	0.58
球状模型	0.11	0.34	19.84	32.24	0.03	0.58

(R^2)等参数,以 R^2 接近于 1、RSS 值趋近于 0 为选取依据,最终得出高斯模型为最佳拟合模型。高斯模型下土壤有机碳密度块金值和基台值分别为 0.13 和 0.33,表明总变异程度与随机变异程度较小;变程为 15.30 m,说明空间变异的尺度范围较小,块基比为 40.30%,介于 25%~75% 之间,表明福建省表层土壤有机碳密度在小范围、中等程度上具有空间自相关性,其空间变异由结构性因素和随机性因素共同决定;块基比小于 50%,说明空间变异主要由结构性因素主导,即空间变异更容易受到气候、植被、地形等因素的影响。

2.1.3 空间分布特征

基于半变异函数,对福建省表层土壤有机碳密度采用高斯模型进行克里金插值,得到土壤有机碳密度空间分布图(图3)。整体而言,福建省表层土壤有机碳密度呈现自南向北、从沿海向内陆逐渐升高的空间分布格局。土壤有机碳密度低值区主要在沿海地区呈片状分布,高值区主要在内陆山地呈镶嵌式分布。表层土壤有机碳密度频率统计(表2)表明,福建省表层土壤有机碳平均密度为 $4.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,主要分布在 $>3.00 \sim 7.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,21.17% 的土壤有机碳密度不超过 $3.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,48.28% 的土壤有机碳密度集中在 $>3.00 \sim 5.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,24.57% 的土壤有机碳密度分布在 $>5.00 \sim 7.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内。

2.2 福建省表层土壤有机碳密度影响因素分析

2.2.1 地形气候对土壤有机碳密度的影响

随着海拔的升高,土壤有机碳密度逐渐升高。

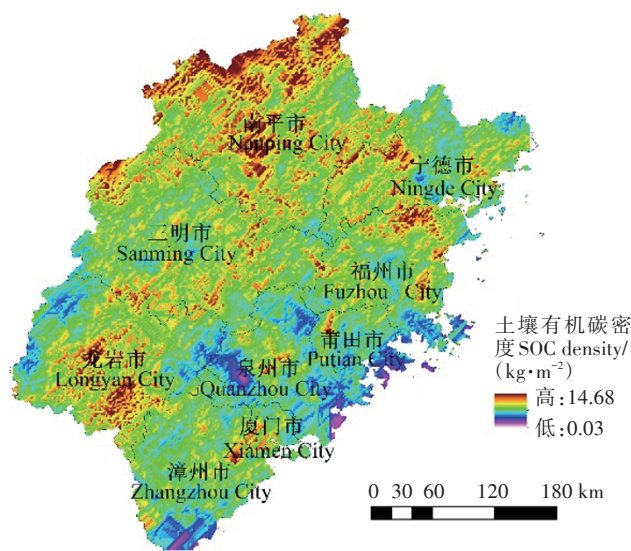


图3 福建省表层土壤有机碳密度空间分布

Figure 3 Spatial distribution of topsoil organic carbon density in Fujian Province

表2 福建省表层土壤有机碳密度频率分布

Table 2 Distribution frequency of topsoil organic carbon density in Fujian Province

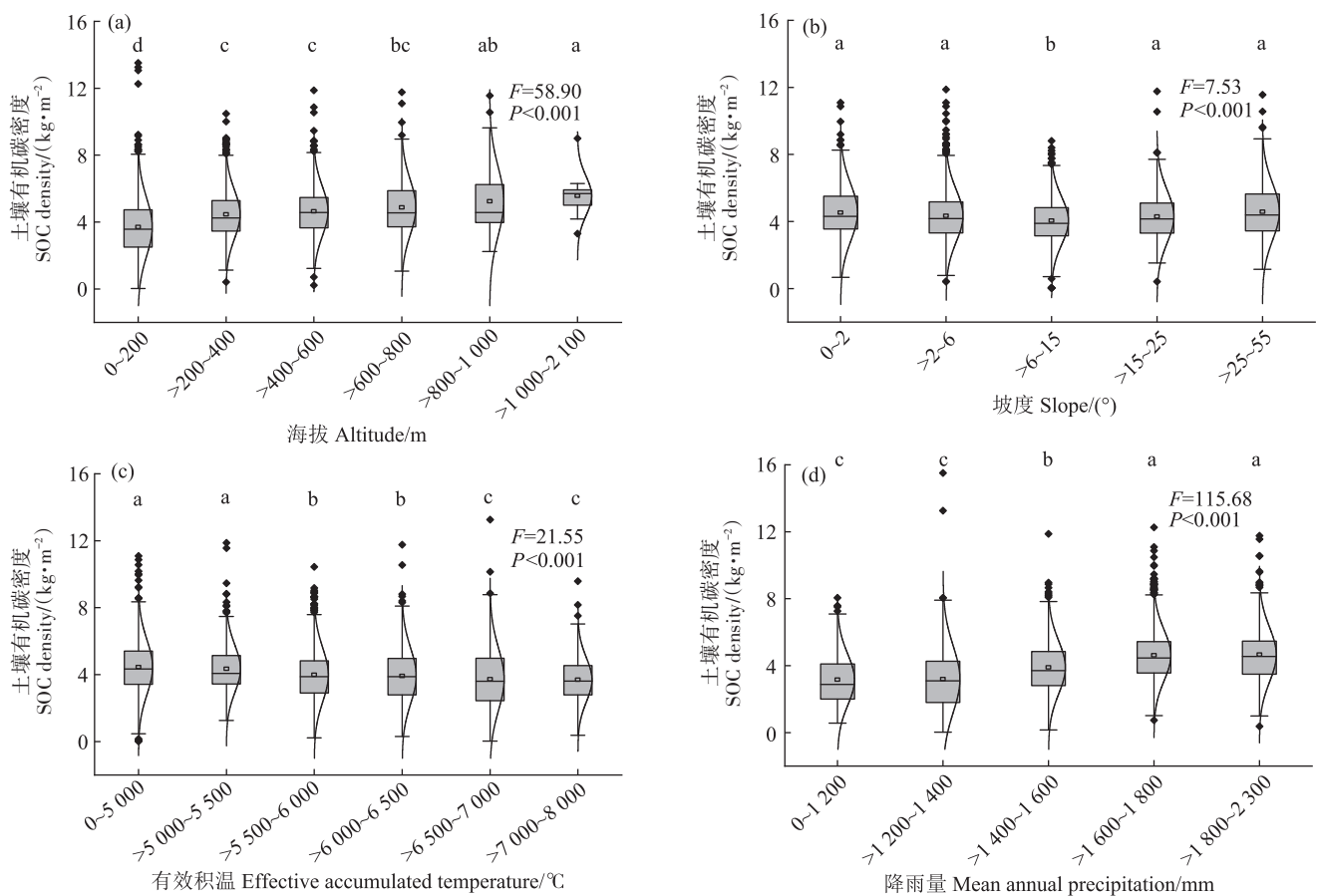
土壤有机碳密度 SOC density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	数量 Quantity	最小值 Minimum/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	最大值 Maximum/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	平均值 Mean/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	标准差 Standard deviation/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	变异系数 Coefficient of variation/%	比例 Percentage/ %
0~3.00	921	0.031	3.00	2.18	0.67	30.73	21.17
>3.00~5.00	2 100	3.001	5.00	3.99	0.55	13.78	48.28
>5.00~7.00	1 069	5.002	7.00	5.79	0.56	9.67	24.57
>7.00~9.00	221	7.001	9.00	7.76	0.57	7.34	5.08
>9.00~14.68	39	9.030	14.68	10.80	1.56	14.44	0.90

海拔为0~200、>200~400、>400~600、>600~800、>800~1 000 m和>1 000~2 100 m时,有机碳密度分别为3.70、4.46、4.65、4.88、5.24 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和5.57 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。海拔<200 m的土壤有机碳密度显著低于其他海拔;海拔>1 000 m的土壤有机碳密度显著高于其他海拔(海拔为800~1 000 m除外)(图4a)。

坡度0~2°、>2°~6°、>6°~15°、>15°~25°和>25°~55°时,土壤有机碳密度分别为4.53、4.34、4.04、4.30

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和4.58 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。随着坡度的增加,表层土壤有机碳密度呈现先降低后升高的趋势(图4b)。

土壤有机碳密度随着有效积温的升高而显著降低。有效积温0~5 000、>5 000~5 500、>5 500~6 000、>6 000~6 500、>6 500~7 000 °C和>7 000~8 000 °C时,土壤有机碳密度分别为4.44、4.34、3.98、3.90、3.72 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和3.69 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。有效积温0~5 000 °C和>5 000~5 500 °C的土壤有机碳密度显著高于其他积温,但两



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

图4 海拔、坡度、有效积温和降雨量对表层土壤有机碳的影响

Figure 4 Effects of altitude, slope, effective accumulated temperature and precipitation on topsoil organic carbon density

者之间差异不显著。有效积温6 500~7 000 °C和>7 000~8 000 °C的土壤有机碳密度显著低于其他有效积温,但两者之间差异不显著(图4c)。

降雨量0~1 200、>1 200~1 400、>1 400~1 600、>1 600~1 800 mm和>1 800~2 300 mm时,土壤有机碳密度分别为3.16、3.19、3.89、4.61 kg·m⁻²和4.65 kg·m⁻²。降雨量0~1 200 mm和>1 200~1 400 mm土壤有机碳密度显著低于其他降雨量,但两者之间差异不显著。降雨量为>1 600~1 800 mm和>1 800~2 300 mm时土壤有机质碳密度差异不显著,但显著高于其他降雨量(图4d)。

2.2.2 土壤pH对有机碳密度的影响

福建省表层土壤有机碳密度随土壤pH升高而显著降低(图5)。当土壤pH≤4.5、4.5<pH≤5.5、5.5<pH≤6.5、

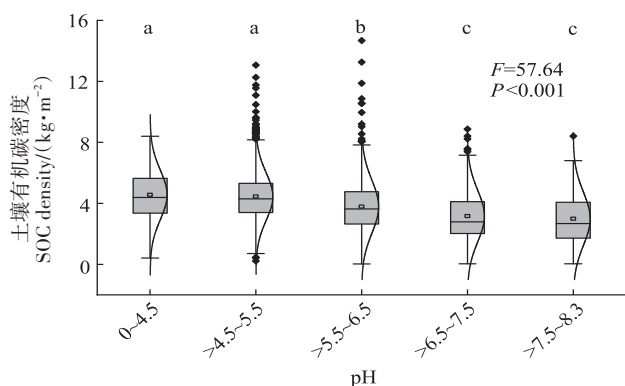


图5 不同土壤pH对表层土壤有机碳密度的影响
Figure 5 Effects of different soil pH on topsoil organic carbon density

6.5<pH≤7.5和7.5<pH≤8.3时,土壤有机碳密度分别为4.56、4.44、3.78、3.17 kg·m⁻²和2.99 kg·m⁻²。pH≤4.5和4.5<pH≤5.5土壤有机碳密度差异不显著,但显著高于其他pH范围;6.5<pH≤7.5和7.5<pH≤8.3土壤有机碳密度显著低于其他pH范围,但两者之间差异不显著。

2.2.3 土壤质地对有机碳密度的影响

不同土壤质地之间土壤有机碳密度差异显著(图6)。黏土土壤有机碳密度最高,为4.68 kg·m⁻²,显著高于壤土(4.11 kg·m⁻²)和砂土(4.09 kg·m⁻²)。

2.2.4 地貌类型和土壤类型对有机碳密度的影响

不同地貌类型和土壤类型之间土壤有机碳密度存在显著差异(表3)。四种地貌中,山地土壤有机碳密度最高,为4.73 kg·m⁻²,显著高于丘陵(4.33 kg·

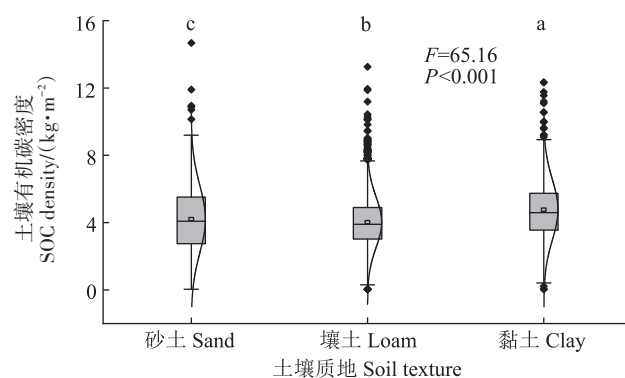


图6 不同土壤质地对表层土壤有机碳密度的影响
Figure 6 Effects of different soil textures on topsoil organic carbon density

表3 不同地貌类型和土壤类型对表层土壤有机碳密度的影响

Table 3 Effects of different geomorphic type and soil type on topsoil organic carbon density

项目 Item	类型 Type	数量 Quantity	最小值 Minimum/(kg·m ⁻²)	最大值 Maximum/(kg·m ⁻²)	土壤有机碳密度均值 Mean SOC density/(kg·m ⁻²)	标准差 Standard deviation/(kg·m ⁻²)	变异系数 Coefficient of variation/%
地貌类型	盆地	110	1.65	8.65	4.11b	1.31	31.87
	平原	804	0.16	13.07	3.47c	1.59	45.82
	丘陵	2 118	0.03	14.68	4.33b	1.65	38.11
	山地	474	0.22	11.87	4.73a	1.64	34.67
土壤类型	滨海盐土	44	0.59	6.42	2.50b	1.06	42.40
	潮土	82	1.77	9.19	4.10a	1.54	37.56
	赤红壤	210	0.38	6.66	2.49b	1.26	50.60
	风沙土	84	0.03	13.26	1.95c	2.01	103.00
	红壤	230	1.15	8.81	4.17a	1.43	34.29
	黄壤	80	0.42	10.70	3.93a	1.56	39.69
	水稻土	3 568	0.22	14.68	4.38a	1.59	36.30
	紫色土	52	0.95	5.88	2.97b	0.98	32.99

注:同列同一项目下不同小写字母表示各类型间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column under the same item indicate significant differences among different types (P<0.05). The same below.

m^{-2})、盆地($4.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)和平原地区($3.47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。丘陵与盆地之间土壤有机碳密度差异不显著,平原地区土壤有机碳密度显著低于其他地貌类型。

水稻土、红壤、潮土、黄壤、滨海盐土、赤红壤、紫色土和风沙土土壤有机碳密度分别为 4.38 、 4.17 、 4.10 、 3.93 、 2.50 、 2.49 、 $2.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,水稻土、红壤、黄壤和潮土之间土壤有机碳密度差异不显著,但显著高于其他土壤类型,滨海盐土、赤红壤和紫色土之间土壤有机碳密度无显著差异,但显著高于风沙土,风沙土土壤有机碳密度显著低于其他土壤类型(表3)。

2.2.5 作物类型对土壤有机碳密度的影响

不同作物类型中土壤有机碳密度最高的是蔬菜和烤烟,土壤有机碳密度均为 $4.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;之后依次为水稻、果树、茶树、块茎作物和油料作物,土壤有机碳密度值分别为 4.51 、 3.80 、 3.74 、 $3.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,烤烟和蔬菜作物土壤有机碳密度显著高于其他作物(除水稻外),油料作物土壤有机碳密度显著低于其他作物(表4)。

2.2.6 施肥量对土壤有机碳密度的影响

随着氮肥施入量的增加,土壤有机碳密度呈下降趋势,但两者相关性不显著。而磷肥、钾肥的施入量与土壤有机碳密度具有显著的负相关关系,随着磷肥和钾肥投入量的增加,土壤有机碳密度显著降低(图7)。

2.3 各因素与土壤有机碳密度的相关性及其重要性分析

土壤有机碳密度与自然气候、地形地貌和土壤理化性质等密切相关,采用Pearson相关性分析,探究土壤有机碳密度与海拔、降雨量、土壤pH、坡度和有效积温的相关性。结果(图8)表明,有机碳密度与海拔和降雨量呈极显著正相关,与土壤pH呈极显著负相关,与坡度和有效积温之间无显著相关关系。利用随机森林模型进一步分析了各因素对土壤有机碳密度的相对重要性,结果(图9)显示降雨量(61.43%)、海

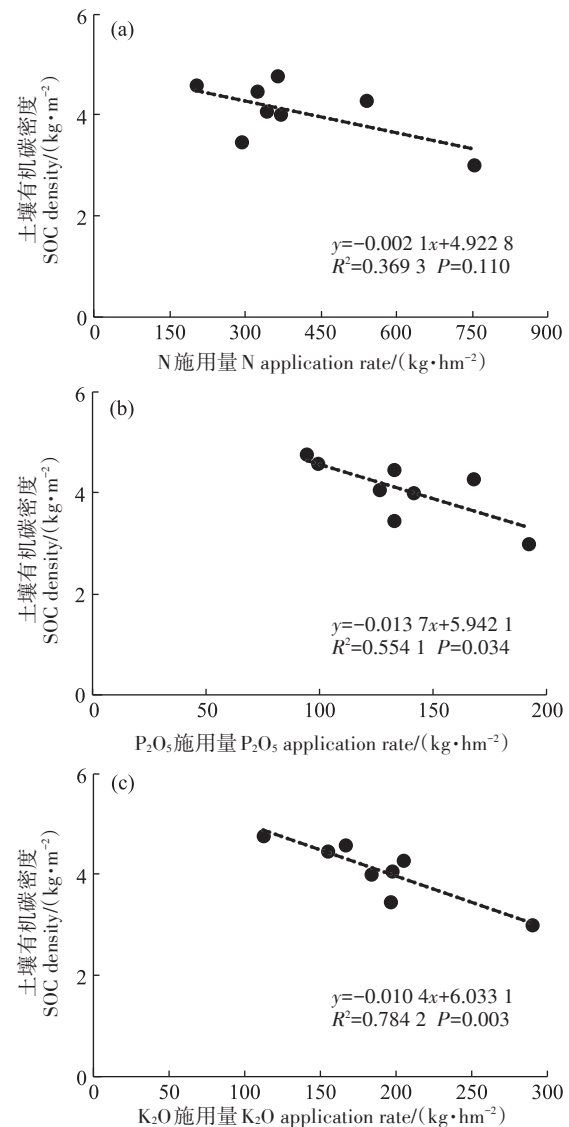


图7 表层土壤有机碳密度与氮肥(a)、磷肥(b)、钾肥(c)施用量的关系

Figure 7 Relation between topsoil organic carbon density and the application rate of nitrogen(a), phosphorus(b), and potassium fertilizer(c)

表4 不同作物类型对表层土壤有机碳密度的影响

Table 4 Effects of different crop types on topsoil organic carbon density

作物类型 Crop type	数量 Quantity	最小值 Minimum/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	最大值 Maximum/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	土壤有机碳密度均值 Mean SOC density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	标准差 Standard deviation/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	变异系数 Coefficient of variation/%
茶树	85	1.41	11.76	3.74b	1.60	42.78
果树	233	0.22	10.31	3.80b	1.40	36.84
烤烟	379	1.38	9.23	4.69a	1.34	28.57
块茎作物	132	0.16	7.65	3.70b	1.58	42.70
蔬菜	338	0.52	11.09	4.69a	1.78	37.95
水稻	2 394	0.42	12.34	4.51ab	1.56	34.59
油料作物	350	0.03	14.68	2.72c	1.79	65.81
其他	153	0.38	13.07	3.78b	1.88	49.73

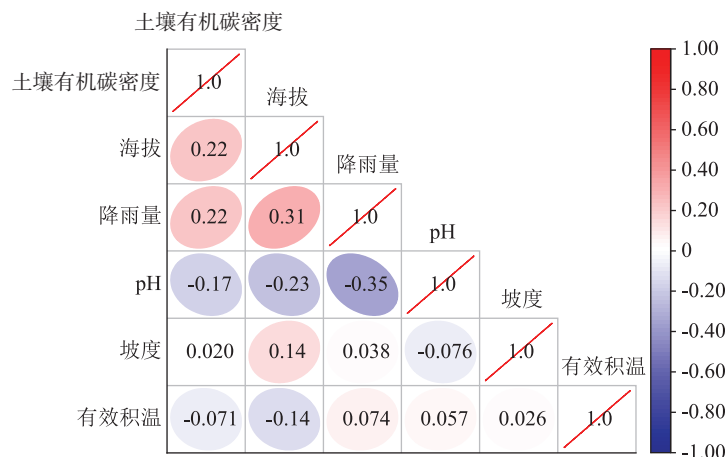
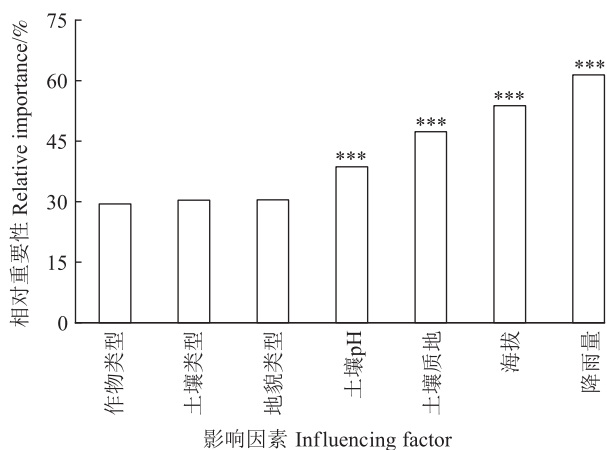


图8 各因素与表层土壤有机碳密度的相关性分析

Figure 8 Pearson correlation of the influencing factors and topsoil organic carbon density



***代表在0.001水平极显著相关。
*** indicate significant correlation at the level 0.001.

图9 各影响因素对福建省表层土壤有机碳密度的相对重要性
Figure 9 The relative importance of influencing factors for topsoil organic carbon density in Fujian Province

拔(53.81%)、土壤质地(47.33%)和土壤pH(38.64%)对于有机碳密度的相对重要性较高,而地貌类型(30.44%)、土壤类型(30.37%)和作物类型(29.44%)相对重要性较低。

3 讨论

3.1 福建省表层土壤有机碳密度估算

本研究表明,福建省表层土壤有机碳密度平均值为 $4.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,福建省表层土壤有机碳平均密度高于河南省($2.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[27]和全国平均水平($2.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[22],而低于湖南省($4.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[28]和云南省($4.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[12]。陈中星等^[19]基于第二次全国土壤普查数据

的研究显示,福建省表层土壤有机碳密度为 $4.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,研究方法、角度以及环境的变化都会使估算存在较大的不确定性,从而导致研究结果存在较大差异^[16]。这可能与研究所使用数据和采集的土壤样本有关,第二次全国土壤普查以来,用地类型的变化、农田集约化管理模式的发展、自然气候的变化、频繁的耕作、大量化肥投入等都可能增加有机碳流失风险^[29]。

3.2 福建省表层土壤有机碳密度影响因素分析

3.2.1 地形因素对表层土壤有机碳密度的影响

海拔、坡度和地貌显著影响福建省表层土壤有机碳密度。以往研究同样显示海拔高度与有机碳密度呈显著正相关^[30-31],这与本研究中表层土壤有机碳密度随海拔的升高而增加的结果一致(图4a)。对喜马拉雅东部森林土壤有机碳的分析表明,有机碳密度与海拔呈显著正相关^[32],这与高海拔地区温度降低和湿度增加有关。温度变化使土壤微生物群落和生物酶活性受到影响,进而影响有机碳矿化和土壤呼吸等活动^[33]。随着温度降低,土壤有机碳的分解速率减缓,导致有机碳积累。此外,海拔通过影响碳周转率、风化强度和次生黏土矿物形成,以及土壤类型和植被分布等直接或间接影响有机碳储量^[34-35]。相关研究也报道了地表有机碳对海拔的敏感性^[36]。因此,在区域尺度上,海拔可能是对有机碳影响最大的因子。

坡度通过影响植被分布、水分运移、土壤颗粒性质等间接影响土壤有机碳密度^[37]。本研究结果显示,当坡度不超过 15° 时,有机碳密度随着坡度的增加而下降,当坡度大于 15° 时,土壤有机碳密度随坡度增加逐渐上升(图4b)。赖晶晶等^[38]的研究结果也显示有机碳密度随坡度呈现先下降后上升的趋势。这可能

是由于福建省山多地少,丘陵地区较多,在0~15°坡度内土壤侵蚀导致水土向下流失,堆积在低坡地区,导致有机碳积累。而在坡度大于15°的地区农用地较少,多为山地和林地,其海拔及植被覆盖率较高,土壤有机碳密度相对较高。

不同地貌类型导致区域温度和湿度不同,从而影响土壤有机碳水平。本研究中山地土壤有机碳密度最高,之后分别是丘陵、盆地和平原。整体上福建省表层土壤有机碳密度随着海拔的上升逐渐增加。而地貌类型通过影响海拔、温度等水热条件间接影响土壤有机碳密度,从平原到山地地区,海拔逐渐增加,气温和湿度降低,有利于土壤有机碳积累,使土壤有机碳密度增加,这与孔祥斌等^[39]的研究结果一致。此外,高有机碳储量与阶地沉积物有关,阶地通常出现在低洼山谷和山地,具有强烈的内涝特征^[41],这也容易导致有机碳的积累。

3.2.2 气候条件对表层土壤有机碳密度的影响

气候条件,如温度和降雨量是影响土壤有机碳循环的重要因素。温度的变化会影响土壤有机碳的释放量,随着温度升高,土壤微生物和酶的活性增强,会加速土壤中有机碳的分解^[40]。积温是指一年内逐日平均温度 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的累加之和,因此积温对土壤有机碳密度的影响应该与温度变化类似。本研究结果表明有效积温的增加显著降低了土壤有机碳密度(图4c)。然而,本研究与代杰瑞等^[41]在山东的研究结果不同,其研究结果显示,土壤有机碳密度变化与积温不存在显著关系,这可能与研究区域的气候条件、土壤理化性质及样本量有关。

土壤有机碳密度随着降雨量的升高而增加(图4d),这与丰思捷等^[42]和Wang等^[43]的研究结果一致,降雨决定了陆地生态环境中土壤碳输入和净初级生产力,并增加土壤湿度^[12]。降雨量的增加会提高植物对可利用含水量的吸收,增强光合作用和植物生产力,导致更多凋落物进入土壤中,从而增加土壤有机碳储量^[44];Starr等^[45]的研究也表明高含水量条件可以促进作物生长,但会减缓土壤有机碳的分解转化,从而增加有机碳密度。

3.2.3 土壤质地和理化性质对土壤有机碳的影响

不同质地土壤有机碳密度存在显著差异(图6)。本研究表明黏土土壤有机碳密度显著高于砂土和壤土,这与Tan等^[34]的研究结果一致。高比例的黏土对表层土壤有机碳密度具有正向影响^[46],土壤黏粒含量高可以有效保护土壤有机质,避免被微生物分解,使有

机碳更容易积累。此外,铁氧化物对土壤中的碳周转和黏土微观结构的影响也不容忽视^[47]。Li等^[48]的研究也证实了有机碳密度与土壤含砂量呈显著负相关。

本研究中福建省表层土壤有机碳密度空间分异明显,表现为有机碳密度由南向北、自沿海向内陆山地逐渐升高的特征,土壤类型由南向北依次为滨海盐土、潮土、风沙土、水稻土和红黄壤。而不同土壤类型之间土壤结构和质地存在明显差异,这直接影响了土壤有机碳分解转化效率^[49],以及土壤有机碳水平分布的南北差异。此外,土壤类型还通过结合母质、气候和地形相关属性来影响土壤有机碳水平^[9]。本研究中风沙土有机碳密度最低,为 $1.95\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,该土壤类型主要分布在沿海平原地区,海拔较低,气温较高,植被覆盖较低,属于砂质土壤,使得有机碳积累较少;土壤有机碳密度较高的类型是红壤和水稻土,分别为 $4.17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $4.38\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,这两种土壤类型主要分布于海拔较高的山地,降雨量更加充足,植被覆盖率高,使得有机碳更容易积累。

土壤pH值也是影响土壤有机碳储量的常见因素,本研究中,土壤有机碳密度随着土壤pH的升高逐渐降低。土壤pH下降会导致土壤有机碳的溶解性降低,土壤中毒性阳离子的数量和活性增加,进而抑制土壤微生物活性,影响土壤有机碳的矿化作用^[50];而碱性环境会促进土壤微生物对有机碳的分解转化,加速有机碳的矿化过程^[51]。此外,刘书田^[52]、戴万宏等^[53]的研究也表明土壤有机碳含量与pH呈负相关关系。

3.2.4 不同作物类型和施肥量对土壤有机碳密度的影响

不同作物种类的土壤有机碳密度存在明显差异。本研究中蔬菜、烤烟、水稻作物体系中土壤有机碳密度较高,而茶树和果树作物类型土壤有机碳密度较低。高燕等^[54]的研究结果显示,与不使用秸秆还田相比,秸秆还田可使表层土壤有机碳储量提高6.23%~27.85%。因此,蔬菜、水稻等作物由于配施有机肥、秸秆还田等措施使有机碳更容易积累,不同作物体系下的施肥及管理方式都可能导致土壤有机碳储量的变化。

随着氮、磷、钾肥投入量的增加,土壤有机碳密度出现不同程度下降(图7),但Shimizu等^[55]的研究结果显示,施用化肥,尤其是氮、磷肥,可显著提高土壤有机碳储量。Zhao等^[56]也报道了中国农田土壤有机碳固定速率随着化学氮肥投入量的增加而升高,但当氮肥投入超过 $290\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,土壤有机碳积累速率呈下降趋势。长期使用单一化肥会破坏土壤的团聚

体结构,加速土壤有机碳的矿化进程,不利于土壤有机碳的积累^[57]。近年来,随着集约化农业的投入及管理模式的发展,福建省化肥施用量逐年增加,年平均氮、磷、钾肥施用量分别为398、136 kg·hm⁻²和189 kg·hm⁻²,因此,过量的化肥施用量可能是造成土壤有机碳流失的原因之一。

4 结论

(1)福建省0~20 cm表层土壤有机碳密度范围为0.03~14.68 kg·m⁻²,平均值为4.06 kg·m⁻²。

(2)福建省表层土壤有机碳密度具有正向空间聚集性,在小范围、中等程度空间自相关,空间变异主要由结构性因素主导。从空间分布来看,福建省土壤有机碳密度自南向北、由沿海向内陆山地逐渐升高,高值区主要在山地呈镶嵌式分布,低值区在沿海地区呈片状分布。

(3)福建省地处我国东南沿海丘陵地区,高温多雨。独特的地势和气候条件影响表层土壤有机碳分布。降雨量、海拔、土壤质地和土壤pH是影响土壤有机碳密度的重要因素,地貌类型、土壤类型和作物类型对土壤有机碳密度的影响相对较弱。

本研究仅对表层土壤有机碳进行研究,未对深层土壤有机碳密度进行估算。土壤有机碳密度与降雨量之间呈显著正相关关系,但降雨量对土壤有机碳储量的作用机制仍需深入开展研究。在提倡农业可持续发展和全球气候变暖的背景下,土壤健康提升与固碳减排仍是热点话题,未来应深入开展土壤碳固持研究,为提升土壤质量和应对环境变化提供理论支持。

参考文献:

[1] 黄巧云,林启美,徐建明.土壤生物化学[M].北京:高等教育出版社,2015:155-157. HUANG Q Y, LIN Q M, XU J M. Soil biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015:155-157.

[2] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870):156-159.

[3] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.

[4] LAL R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66(1):1-9.

[5] OLDFIELD E E, BRADFORD M A, WOOD S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. *Soil*, 2019, 5(1):15-32.

[6] ARUNRAT N, PUMIJUMNONG N, SEREENONCHAI S, et al. Factors controlling soil organic carbon sequestration of highland agricultural ar-

eas in the Mae Chaem Basin, northern Thailand[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2):305.

[7] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2):317-331. ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2):317-331.

[8] CASTELLANO M J, MUELLER K E, OLK D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(9):3200-3209.

[9] WIESMEIER M, URBANSKI L, HOBLEY E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils: a review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333:149-162.

[10] REYNA-BOWEN L, LASOTA J, VERA-MONTENEGRO L, et al. Distribution and factors influencing organic carbon stock in mountain soils in Babia Góra National Park, Poland[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15):3070.

[11] VOS C, DON A, HOBLEY E U, et al. Factors controlling the variation in organic carbon stocks in agricultural soils of Germany[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(3):550-564.

[12] SUN T, TONG W J, CHANG N J, et al. Estimation of soil organic carbon stock and its controlling factors in cropland of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(5):1475-1487.

[13] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2314-2319. ZHANG Y, SHI X Z, ZHAO Y C, et al. Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2314-2319.

[14] 于沙沙, 窦森, 黄健, 等. 吉林省耕层土壤有机碳储量及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1973-1980. YU S S, DOU S, HUANG J, et al. Organic carbon storage of cultivated topsoils and its influencing factors in Jilin Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1973-1980.

[15] LIAO C, LUO Y, FANG C, et al. Ecosystem carbon stock influenced by plantation practice: implications for planting forests as a measure of climate change mitigation[J]. *PLoS ONE*, 2010, 5(5):e10867.

[16] 刘苗, 刘国华. 土壤有机碳储量估算的影响因素和不确定性[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7):1222-1232. LIU M, LIU G H. Impact factors and uncertainties of the estimation on soil organic carbon storage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(7):1222-1232.

[17] 王义祥, 翁伯琦. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算[J]. 福建农业学报, 2005, 20(1):42-45. WANG Y X, WENG B Q. Estimate of soil organic carbon density and its stock in Fujian Province[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 20(1):42-45.

[18] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2019, 33(6):1295-1305. WANG W J. Reserve estimation, spatiotemporal distribution and its influencing factors of soil organic carbon in Fujian Province, China[J]. *Geoscience*, 2019, 33(6):1295-1305.

[19] 陈中星, 张楠, 张黎明, 等. 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效

- 应研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(3):606-619. CHEN Z X, ZHANG N, ZHANG L M, et al. Scale effects of estimation of soil organic carbon storage in Fujian Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3):606-619.
- [20] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州:福建科学技术出版社, 1991:287-289. Soil Survey Office of Fujian Province. Fujian soil[M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1991:287-289.
- [21] 徐艳, 张凤荣, 段增强, 等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 土壤通报, 2005, 36(6):836-839. XU Y, ZHANG F R, DUAN Z Q, et al. Calculation method for density and storage of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6):836-839.
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1):35-43. XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):35-43.
- [23] 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙. 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, 43(4):2124-2132. CHEN Q X, LU X H, TU C L. Spatial variation and influencing factors of soil pH in Anshun City[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4):2124-2132.
- [24] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3):743-754. YANG J H, LIU M Y, ZHANG J, et al. Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3):743-754.
- [25] 任加国, 王彬, 师华定, 等. 沱江上游支流土壤重金属污染空间相关性及其变异解析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3):530-541. REN J G, WANG B, SHI H D, et al. Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metals contamination in upper source tributary of Tuojiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3):530-541.
- [26] 陈洋, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 多重密度布点对土壤有机质空间特性的解析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12):2099-2110. CHEN Y, QI Y B, WANG Y Y, et al. Spatial characters of soil organic matter with multi-sampling density[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12):2099-2110.
- [27] 靳熙. 河南省耕地表层土壤有机碳储量估算与尺度效应分析[D]. 郑州:郑州大学, 2014:22-24. JIN X. Estimation of the organic carbon storage in cultivated surface soil and analysis of its scale effect in Henan Province[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2014:22-24.
- [28] 杨琪. 湖南省耕地表层土壤碳储量研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2015:35-37. YANG Q. Study on carbon storage of cultivated land topsoil in Hunan Province[D]. Changsha:Hunan Agricultural University, 2015:35-37.
- [29] 侯艳娜, 武红旗, 田建华, 等. 近40年来天山北坡不同土类农田土壤有机碳含量变化特征分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(2):423-429. HOU Y N, WU H Q, TIAN J H, et al. Analysis of soil organic carbon content in different soil types farmlands on the northern slope of the Tianshan Mountains in last 40 years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(2):423-429.
- [30] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3):469-476. FU H, CHEN Y M, WANG Y R, et al. Organic carbon content in major grassland types in Alex, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3):469-476.
- [31] WIESMEIER M, HÜBNER R, BARTHOLD F, et al. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria)[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 176:39-52.
- [32] TASHI S, SINGH B, KEITEL C, et al. Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(6):2255-2268.
- [33] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 等. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6):888-894. WEI Y Y, YIN H J, LIU Q, et al. Advance in research of forest carbon cycling under climate warming[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(6):888-894.
- [34] TAN Z X, LAL R, SMECK N E, et al. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables[J]. *Geoderma*, 2004, 121(3/4):187-195.
- [35] SOUCEMARIANADIN L N, CECILLON L, GUENET B, et al. Environmental factors controlling soil organic carbon stability in French forest soils[J]. *Plant and Soil*, 2018, 426(1/2):267-286.
- [36] DUAN X, RONG L, HU J, et al. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, southwest China: spatial variations and environmental controls[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(10):1643-1658.
- [37] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5):858-869. WU H. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for pine-oak mixed forest in Qinling Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5):858-869.
- [38] 赖晶晶, 张世熔, 刘艳婷, 等. 基于多元分析的岷江下游土壤有机碳密度空间分布及影响因素研究[J]. 土壤, 2016, 48(1):159-166. LAI J J, ZHANG S R, LIU Y T, et al. Spatial distribution and its influence factors of soil organic carbon density of lower reaches of Minjiang River based on multivariate analysis method[J]. *Soils*, 2016, 48(1):159-166.
- [39] 孔祥斌, 胡莹洁, 李月, 等. 北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(12):2307-2315. KONG X B, HU Y J, LI Y, et al. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing[J]. *Resources Science*, 2019, 41(12):2307-2315.
- [40] JENKINSON D S, ADAMS D E, WILD A S. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351:304-306.
- [41] 代杰瑞, 庞绪贵, 曾宪东, 等. 山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9):1449-1458.

- DAI J R, PANG X G, ZENG X D, et al. Soil carbon density and distribution and influencing factors in Shandong Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1449–1458.
- [42] 丰思捷, 赵艳云, 李元恒, 等. 内蒙古典型草原表层土壤有机碳储量差异及影响因素[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(2): 116–120. FENG S J, ZHAO Y Y, LI Y H, et al. The differences and influencing factors of topsoil organic carbon storage in typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(2): 116–120.
- [43] WANG X, LI Y, GONG X, et al. Storage, pattern and driving factors of soil organic carbon in an ecologically fragile zone of northern China [J]. *Geoderma*, 2019, 343: 155–165.
- [44] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1867–1874. ZHOU X Y, ZHANG C Y, GUO G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1867–1874.
- [45] STARR G C, LAL R, MALONE R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes[J]. *Land Degradation & Development*, 2000, 11(1): 83–91.
- [46] SHI W, TATENO R, ZHANG J, et al. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest–grassland transition zone of the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 854–863.
- [47] VON LUTZOW M, KOGEL-KNABNER I, LUDWIG B, et al. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 111–124.
- [48] LI Y, WANG X, NIU Y, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in the ecologically fragile Horqin Grassland of northeastern China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 102–109.
- [49] WU L Z, LI L, YAO Y F, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors at different soil depths in a semiarid region of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(19): 654.
- [50] VANCE G F, DAVID M B. Forest soil response to acid and salt additions of sulfate: III. solubilization and composition of dissolved organic carbon[J]. *Soil Science*, 1991, 151(4): 297–305.
- [51] 唐敏. 中国土壤有机碳时空分布及影响因素研究进展[J]. *河南工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 31(4): 42–49. TANG M. Research advances in spatial and temporal distribution of soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. *Journal of Henan University of Engineer*, 2019, 31(4): 42–49.
- [52] 刘书田. 中国农田土壤有机碳时空分布规律及影响因素研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016: 124–125. LIU S T. The rule of temporal and spatial distribution of soil organic carbon of cropland and its influencing factors in China[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016: 124–125.
- [53] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 851–860. DAI W H, HUANG Y, WU L, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in topsoil of zonal soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 851–860.
- [54] 高燕, 张延, 郭亚飞, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳周转的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(1): 93–101. GAO Y, ZHANG Y, GUO Y F, et al. Effect of residue return patterns on soil organic carbon turnover: a review[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(1): 93–101.
- [55] SHIMIZU M, LIMIN A, DESYATKIN A R, et al. Effect of manure application on seasonal carbon fluxes in a temperate managed grassland in southern Hokkaido, Japan[J]. *Catena*, 2015, 133: 474–485.
- [56] ZHAO Y, WANG M, HU S, et al. Economics and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045–4050.
- [57] 王玲莉, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 79–83. WANG L L, HAN X R, YANG J F, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions in a brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(1): 79–83.