

红层区耕地土壤有机碳储量估算与固碳潜力分析*

周萌¹, 梁志鹏¹, 邹天祥¹, 涂俊喜¹, 胡炎凤¹, 沈文杰^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 珠海 519082

摘要: 土壤有机碳储量是衡量土壤养分和环境质量的关键指标, 对土地的开发利用和实现碳中和具有重要意义, 但目前有关红层区耕地土壤有机碳储量的研究尚少。本文以连州红层区耕地0~20 cm表层土壤为研究对象, 利用普通克里金插值法估算土壤有机碳密度与储量并分析其分布特征, 计算其土壤固碳潜力。结果显示, 2007—2019年间有机碳密度整体呈下降趋势, 平均有机碳密度从4.624 kg/m²下降至2.668 kg/m², 有机碳储量由1.99×10⁹ kg下降为1.21×10⁹ kg, 土壤固碳潜力为9.42×10⁸ kg。连州红层区耕地土壤有机碳储量大幅下降的主要原因是其农业条件存在灌溉设施薄弱、耕地利用强度高、肥料投入不足和缺少精准施肥等问题, 通过改善农田基本设施、减少农田弃耕撂荒、降低土壤的高强度利用、科学合理施用化肥等措施, 可提高连州红层区耕地土壤有机碳储量, 促进连州农业绿色低碳可持续性发展。

关键词: 有机碳密度; 有机碳储量; 固碳潜力

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)03-0012-09

Estimation of organic carbon storage and carbon sequestration potential of cultivated soil in red beds area

ZHOU Meng¹, LIANG Zhipeng¹, ZOU Tianxiang¹, TU Junxi¹, HU Yanfeng¹, SHEN Wenjie^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Guangdong Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources Exploration, Zhuhai 519082, China

Abstract: The storage of soil organic carbon is a crucial metric for assessing soil nutrients and environmental quality, and it is of great importance for land development, utilization, and achieving carbon neutrality. However, little research has been done on soil organic carbon storage in cultivated land in the red beds region. This study focused on the 0-20 cm surface soil of cultivated land in the red beds region of Lianzhou city, utilizing the ordinary Kriging interpolation method to estimate the density and storage of soil organic carbon. The study analyzed the distribution characteristics and soil carbon sequestration potential as well. The results indicate that overall organic carbon density showed a downward trend from 2007 to 2019. The average organic carbon density decreased from 4.624 kg/m² to 2.668 kg/m², and the organic carbon storage decreased from 1.99×10⁹ kg to 1.21×10⁹ kg. The soil carbon sequestration potential was calculated to be 9.42×10⁸ kg. The significant decrease in soil organic carbon storage in the red beds region of Lianzhou city is primarily due to weak irrigation facilities,

* 收稿日期: 2023-10-13 录用日期: 2023-11-23 网络首发日期: 2024-03-20
基金项目: 国家自然科学基金(42072229); 广州市科技计划项目(202002030184, 201804010190);
NFSC-广东联合基金(U1911202)
作者简介: 周萌(1999年生), 男; 研究方向: 地球化学; E-mail: zhoum47@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 沈文杰(1978年生), 男; 研究方向: 地球化学; E-mail: shenwjie@mail.sysu.edu.cn

high intensity of farmland utilization, insufficient fertilizer input, and lack of precise fertilization in agricultural conditions. By improving basic agricultural facilities, reducing abandoned farmland, decreasing high-intensity soil utilization, and scientifically and reasonably applying fertilizers, the organic carbon storage of farmland in the red beds region of Lianzhou city can be increased, promoting the sustainable development of green, low-carbon agriculture in Lianzhou city.

Key words: organic carbon density; organic carbon storage; carbon sequestration potential

在陆地生态系统中, 全球土壤碳库储量约为2万亿吨, 是大气碳库的2倍, 是生物圈碳库的2~3倍(李龙等, 2016)。土壤碳库包括有机碳库和无机碳库两部分, 主要位于土壤0~100 cm的有机碳库, 不仅串联起了大气圈、生物圈、水圈和岩石圈等各个圈层的碳循环系统(赵其国, 1997; Morisada et al., 2004), 还是土壤养分、环境质量等方面的关键衡量指标, 在维持陆地生态系统碳循环平衡和生态安全方面发挥着重要的作用(潘根兴等, 2000)。因此分析土壤有机碳的时空分布与评价土壤有机碳的储量, 这对于土地的可持续开发利用以及应对气候危机实现碳中和具有重要意义。

早期土壤有机碳估算方法有植被类型法、土壤类型法等, 这些方法虽然可以基于少量土壤数据估算出全球有机碳储量(Rubey, 1951; Bohn, 1976), 但存在成本高、统计数据难且不适用于小区域等问题。随着地理信息系统技术(GIS)的发展, 地统计学和克里金插值法得到了广泛应用, 如利用普通克里金插值法估算中国亚热带某马尾松林有机碳储量(Yao et al., 2019), 应用回归克里金插值法估算喜马拉雅山脉东部土壤有机碳储量(Dorji et al., 2014)。此外, 由于有机碳的分布具有空间变异性, 因此选取合适的研究区域和研究尺度是估算有机碳储量的关键。自20世纪80年代以来, 许多学者在大区域尺度上对土壤有机碳储量开展了估算研究(解宪丽等, 2004; 金峰等, 2001), 随着研究的深入, 小区域尺度和特殊土壤类型的有机碳储量估算研究也逐渐增多(郑姚闽等, 2013; Ross et al., 2016), 但针对红层土壤有机碳储量的研究还比较少。作为一种特殊的沉积地层, 红层在我国主要分布于西南、华南、东南和西北地区, 具有很高的研究价值。连州具有广东省典型红层区, 且红层区内耕地面积广泛, 作为广东省重要的“菜篮子”“果盘子”基地, 研究连州红层区耕地土壤有机碳储量, 对于耕地的合理开发和利用, 深入推进乡村振兴, 发展可持续农业具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

连州位于广东省清远市西北部, 东经112°07′~112°47′, 北纬24°37′~25°12′, 地处南岭之中的萌渚岭南麓, 西、北、东三面山地, 中部稍低, 全市总面积约2 650 km²; 属亚热带季风气候, 受季风影响大, 具有典型的山区气候特征(谢军等, 2019)。年平均气温19.7 °C, 年平均日照总时数约1 510 h, 年平均降雨量约1 600 mm。连州下辖12个乡镇, 总耕地面积约400 km²。根据连州土壤普查资料, 土壤类型为水稻土、黄壤、红壤、红色石灰土、黑色石灰土、紫色土、菜园地土、潮砂土8个土类(陈东平等, 2021)。区内地层由老到新依次为寒武系、泥盆系至白垩系、古近系、第四系, 红层区主要为白垩系下统长坝组与白垩系上统至古近系古新统的丹霞组, 总面积约为440 km², 根据方位可将其划分为西部红层区A、南部红层区B、北部红层区C和东部红层区D(图1)。

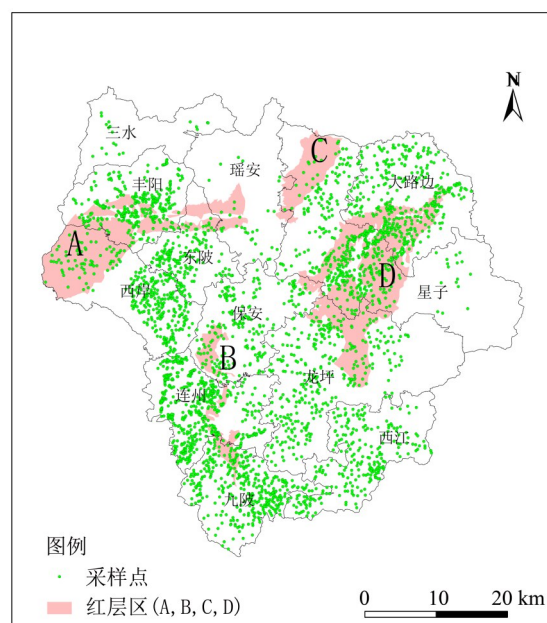


图1 连州红层区与2019年本研究采样点
Fig. 1 Distribution map of red beds in Lianzhou and sampling sites in 2019

1.2 样品与分析

为研究连州红层区耕地土壤不同年份有机碳储量,参照2007年《连州测土配方施肥补贴项目耕地地力评价报告》,于2019年3~6月开展了样品采集工作。依据该报告中记录的采样点经纬度坐标,在原位置上使用相同的采样方法重新采样共计3 009个(图1),每一个样品使用“S”型或“X”型布设分样点,采集0~20 cm的表层土壤样品,分样充分混合后使用四分法取1 kg,同时记录耕地类型、海拔高度等信息。土壤样品的处理与测试方法与2007年保持一致,待样品自然风干后,使用2 mm筛网剔除其中杂质过筛保存,按照国家标准NY/T 85-1988采用重铬酸钾法对土壤有机质进行测定。同时通过中国地理空间数据云平台及美国国家航空航天局LPDAAC数据分发中心获取了研究区内相关地形地貌、气候环境等数据信息,主要参数有日间地表温度、高程、高程变异系数等。

1.3 研究方法

1.3.1 基于普通克里金插值的土壤有机碳储量估算方法

土壤有机碳密度具有空间变异性,利用普通克里金插值法可以将实际采样点数据空间化,得到未知样点的线性无偏最优估计值,其半变异函数为(陈昭等,2019)

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

式中 h 为样本距离; $N(h)$ 为距离为 h 时的点对数; $z(x_i)$ 为点 x_i 的属性值; $\gamma(h)$ 为半变异函数值。

拟合半变异函数的常用模型有线性模型、球型模型、指数模型和高斯模型,本文以决定系数 R^2 最大、残差平方和RSS最小的模型作为最优半变异函数模型(Liu et al.,2013),计算公式(刘需珈等,2019)为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \bar{Z})^2},$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2,$$

式中 $Z^*(x_i)$ 为点 x_i 处的估计值; $Z(x_i)$ 为点 x_i 处的实际值; \bar{Z} 为 i 个实际值的平均值。

根据普通克里金插值结果,计算得到土壤有机碳密度(SOCD,kg/m²)

$$SOCD = SOCC \times BD \times H,$$

土壤有机碳储量(SOCS,kg),

$$SOCS = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n SOCD_i \times A_i,$$

式中SOCD为土壤有机碳密度(kg/m²),SOCC为土壤有机碳含量(g/kg),BD为土壤容重(g/cm³),

H 为样品深度(cm),SOCS为总有机碳储量(kg), A_i 为将总土壤面积划分为 n 个区域后第 i 个区域的土壤面积大小(m²)。

由于缺乏土壤容重数据,本文依据中国常见的不同类型土壤传递函数(韩光中等,2016),采用铁铝土土纲公式计算容重

$$BD = 0.186 \times 1.541 / [1.541SOM + 0.186(1 - SOM)]$$

式中BD为土壤容重(g/cm³),SOM为土壤有机质含量(g/kg)。

1.3.2 土壤固碳潜力估算方法

常被用于估算土壤固碳潜力的方法有:最大值法、历史数据比较法、饱和值法、土地利用方式对比法。最大值法通过使每个样点都达到现有样点有机碳密度中的最高水平,然后将每个样点所代表的区域进行累加,得到固碳潜力值;历史数据比较法以有机碳储量最高的年份作为基准,目前与最高储量之间的差值作为潜力值;饱和值法基于田间长期定位试验,计算有机碳逐年变化与投入有机质、碳固持速率与时间的关系,得到回归方程以计算与饱和水平的差值;土地利用方式对比法则以土壤恢复到自然植被后带来的有机碳储量增加量作为固碳潜力值。4种方法的计算公式分别如下(师晨迪等,2019;周金霖等,2015;孙文娟等,2008):

$$SOCP_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (SOCD_{\max} - SOCD_i) \times A_i,$$

$$SOCP_2 = SOCS_{\max} - SOCS_{\min},$$

$$SOCP_3 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (SOCD_{\text{sat}} - SOCD_i) \times A_i,$$

$$SOCP_4 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (SOCD_{\text{nat}} - SOCD_i) \times A_i,$$

式中SOCP₁₋₄为4种方法计算的固碳潜力,SOCD_{max}为现有样点中有机碳密度的最大值,SOCD_{sat}为有机碳密度的饱和值,SOCD_{nat}为自然植被状态下土壤有机碳密度, A_i 为将总土壤面积划分为 n 个区域后第 i 个区域的土壤面积大小。

2 结果与分析

2.1 空间自相关分析与精度验证

进行普通克里金插值的基本要求是数据具有空间自相关性,本文采用GS+9.0地统计分析软件分别进行线性、球型、指数和高斯4种常用理论模型的拟合(表1),其中指数模型残差平方和RSS最小且决定系数 R^2 最大,块金系数(0.138)小于0.25,说明系统以结构性变异为主,空间自相关性显著(马利芳等,2019),故选择指数模型进行普通克里金插值。

表1 不同模型拟合结果比较

Table 1 Comparison of fitting results of different model

模型	块金值	基台值	块金系数	变程	残差平方和	决定系数
线性	1.604	1.917	0.837	32 329.837 1	0.061 2	0.679
球型	0.098	1.790	0.055	2 200.000 0	0.071 1	0.628
指数	0.248	1.798	0.138	3 030.000 0	0.055 7	0.716
高斯	0.278	1.790	0.155	1 887.935 4	0.055 7	0.628

为验证插值结果的精度, 将原始数据分成训练集和测试集2个部分(比例为8:2), 比较测试集的真实值与预测值, 计算模型均方根误差、标准均方根误差、标准平均值误差、平均标准误差分别为1.175 5、0.995 5、0.000 2和1.181 9。该结果满足精度验证的一般标准, 即标准平均值误差接近0、标准均方根误差接近1、均方根误差最小、平均标准误差接近于均方根误差(李海萍等, 2021), 说明使用指数模型进行普通克里金插值具有较好的预测结果。

2.2 土壤有机碳密度及储量特征

统计各红层区0~20 cm深度土壤有机碳密度与储量(图2), 可知从2007年到2019年连州红层区土壤有机碳密度呈下降趋势, 平均有机碳密度从4.229~5.118 kg/m²降低为2.526~3.103 kg/m², 低于广东省农田土壤有机碳平均密度3.64 kg/m²(任向宁

等, 2021)。红层区耕地土壤总有机碳储量从2007年到2019年由1.99×10⁹ kg减少为1.21×10⁹ kg, 降幅达39.43%, 该区域0~20 cm深度土壤中有机碳储量下降显著。

不同红层区对比结果显示, 区域B在2007年具有最高的有机碳密度, 有机碳密度由高到低依次为B、A、C、D, 且4个区域均高于广东省农田土壤平均有机碳密度3.64 kg/m²。与2007年相比, 2019年各区域有机碳密度均下降到广东省农田土壤有机碳密度平均水平以下, 有机碳密度最高区域为A, 由高到低依次为A、B、C、D。计算A、B、C、D各区域降低幅度百分比为36.91%、45.19%、43.25%、40.27%, 可知区域B其有机碳初始密度最高同时具有最大的下降幅度, 区域A初始有机碳密度次高但下降幅度最小, 区域C、D初始有机碳密度处于中间水平但下降幅度较大。

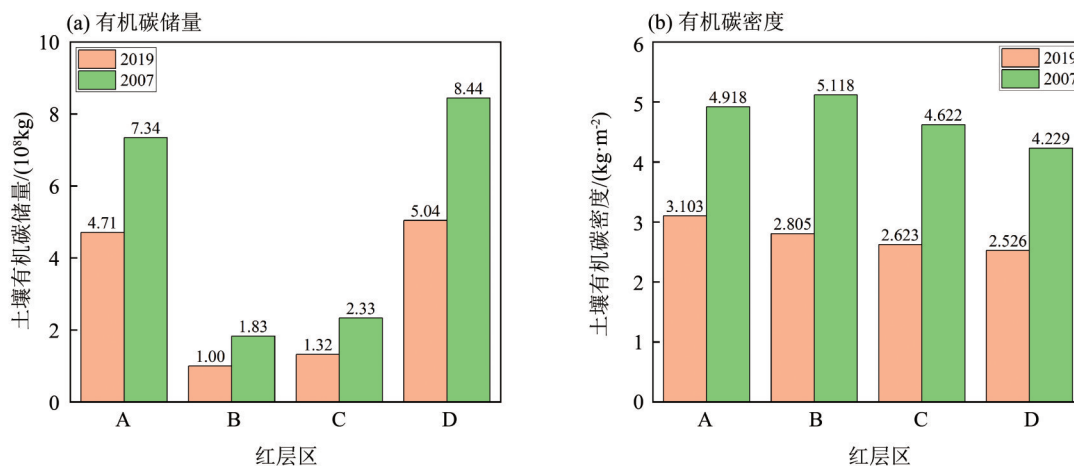


图2 2019年与2007年连州各红层区耕地土壤的有机碳储量(a)和土壤有机碳密度(b)

Fig. 2 Organic carbon storage (a) and organic carbon density (b) of cultivated soils in various red beds in Lianzhou in 2019 and 2007

2.3 土壤有机碳密度空间分布特征

利用指数模型进行普通克里金插值得到2019年与2007年土壤有机碳密度空间分布图(图3)。结果显示, 2019年连州红层区土壤有机碳密度为1.014~4.767 kg/m², 平均值为2.668 kg/m²。其中星

子镇中部最低, 仅为1.014~2.500 kg/m², 龙坪镇、西岸镇、丰阳镇、东陂镇、瑶安乡均有小部分区域达3.500 kg/m²以上; 2007年连州红层区土壤有机碳密度范围为2.545~6.464 kg/m², 平均值为4.624 kg/m², 除星子镇中部有机碳密度较低外, 其

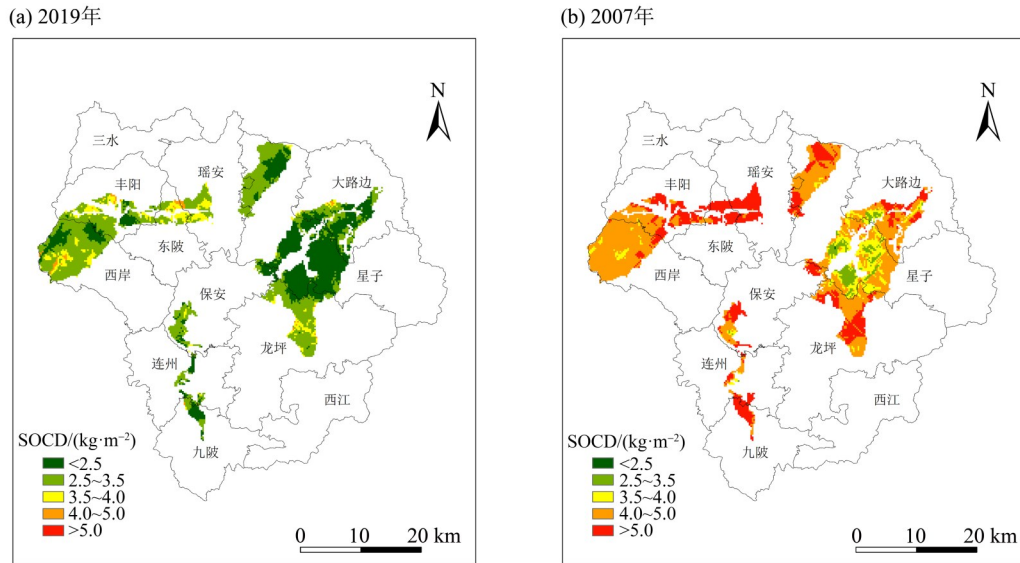


图3 2019年与2007年土壤有机碳密度分布图

Fig. 3 Distribution map of soil organic carbon density in 2019 and 2007

他区域均集中在 4.000 kg/m^2 以上。与2007年相比,2019年连州红层区域有机碳密度整体呈现下降趋势,其中降低幅度最大的区域分布在丰阳镇、东陂镇、瑶安乡、九陂镇、龙坪镇、大路边镇及星子镇西北部,降幅可达 3.000 kg/m^2 以上,降幅较小的区域主要分布在星子镇中部,降幅约为 2.500 kg/m^2 。

从不同有机碳密度区间土地面积占比来看,2019年,有机碳密度为 $2.500\sim 3.500\text{ kg/m}^2$ 的土壤面积最大,占总面积的 51.23% ,其次是有机碳密度小于等于 2.500 kg/m^2 的土壤面积占总面积的 38.85% ,大于 5.000 kg/m^2 的土壤面积基本为0,而 $3.500\sim 5.000\text{ kg/m}^2$ 的土壤面积仅占 9.92% 。2007年有机碳密度为 $4.000\sim 5.000\text{ kg/m}^2$ 和大于 5.000 kg/m^2 的土壤面积最大,分别占总面积的 54.92% 和 29.15% ,小于 2.500 kg/m^2 的土壤面积基本为0,而有机碳密度为 $2.500\sim 4.000\text{ kg/m}^2$ 的土壤面积仅占 15.92% 。

与2007年相比,2019年连州红层区 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤有机碳密度整体下降且变化较为剧烈,最大值、最小值、均值都发生了显著的降低,土壤有机碳储量也显著降低,区域内存在土壤有机碳大量流失的问题。

计算土壤有机碳密度与高程、高程变异系数、日间地表温度的相关系数,结果分别为 0.034 、 -0.018^* ($P<0.05$)、 -0.228^{**} ($P<0.01$)。可知,高程与土壤有机碳密度没有显著的线性相关关系,高程变异系数、日间地表温度与土壤有机碳密度存

在负相关性。研究区高程、高程变异系数与日间地表温度分布见图4和图5。红层区D与B高程最小,平均高程约为 100 m ,红层区C高程最大,平均约为 $800\sim 900\text{ m}$,红层区A平均高程约为 300 m 。结合图3土壤有机碳密度分布图可以看出,各红层区高程从高到低排序为 $C>A>B>D$,2007年土壤有机碳密度排序为 $B>A>C>D$,2019年土壤有机碳密度排序为 $A>B>C>D$,C、D分别为研究区内高程最大和最小的区域,它们的有机碳密度较低,而A、B区域高程在中间水平,它们的有机碳密度较高,这说明有机碳密度在研究区内可能存在随高程先升高后降低的非线性关系。高程变异系数反映了地形的复杂程度,研究区内土壤有机碳密度与高程变异系数仅存在较微弱的负相关关系,这可能是地形复杂度高的区域其土壤侵蚀和流失程度更大、水资源分布不均影响微生物的生长与分解作用导致(Mueller & Pierce, 2003)。从图6中2019年与2007年红层区日间地表温度分布可以看出相较于整个红层区,区域D其日间地表温度较高,区域B的地表温度在两个年份中上升最为明显,这与区域D是红层区内有机碳密度最低、区域B是所有区域中有机碳密度下降幅度最大的现象相对应,日间地表温度与土壤有机碳密度存在显著的负相关关系。

3 讨论

3.1 土壤有机碳储量影响因素

1) 成土母质。连州红层区耕地土壤类型主要

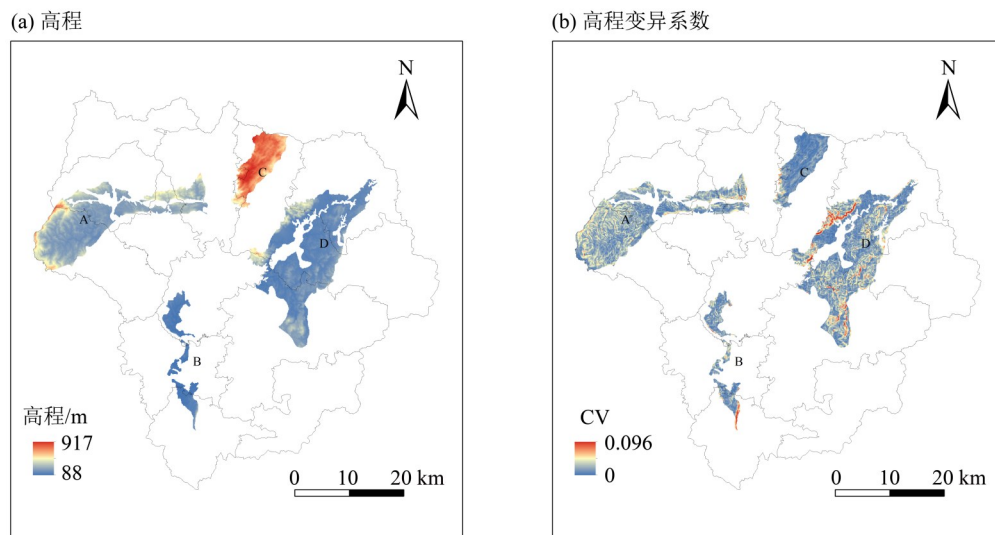


图4 高程与高程变异系数分布图

Fig. 4 Distribution map of elevation and elevation variation coefficient

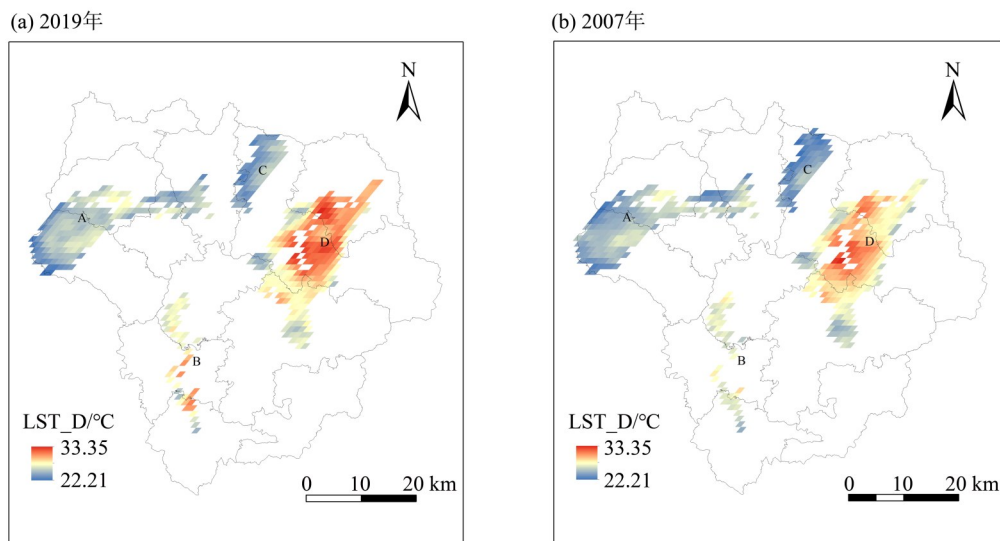


图5 2019年与2007年日间地表温度分布图

Fig. 5 Distribution map of daytime surface temperature in 2019 and 2007

为红壤, 继承了其母岩有机碳含量偏低的特性。区内红层主要分布于白垩系下统长坝组与白垩系上统丹霞组, 以紫红色砾岩至粉砂岩为主。白垩系大洋红层是在富氧条件下形成的一套粉红色至棕色的细粒沉积物, 其有机质含量极低(王成善等, 2009)。在白垩系大规模岩浆活动的影响下, 最终导致大气温度升高, 粤北丹霞组典型红层是此时温室气候条件下地表干燥氧化沉积环境的产物(陈留勤等, 2019)。除气候条件对有机碳来源的影响外, 有机碳在热演化过程中的损失、物源沉积速率与有机质沉积速率的差异, 可能是其土壤有机碳初始密度偏低的又一原因(肖丹等, 2015)。

2) 地形地貌、气候环境。有研究表明, 高程与土壤有机碳密度关系曲线为抛物线型, 即在低海拔区(<600 m)有机碳密度随高程升高而增加, 在中间海拔区域(600~650 m)出现有机碳密度最高值, 随后海拔越高(>700 m)土壤有机碳密度逐渐降低(李龙等, 2014)。本文中土壤有机碳密度随高程增加出现了先上升后降低的近似抛物线型趋势。在海拔较低的区域, 人类活动影响较大, 有机碳密度普遍较低; 随着海拔升高, 人为扰动程度的降低以及温度的下降减缓了有机碳的释放速率, 有机碳密度存在增加的趋势; 在海拔更高的区域, 虽然人类活动影响更小, 但由于植被稀疏、基岩

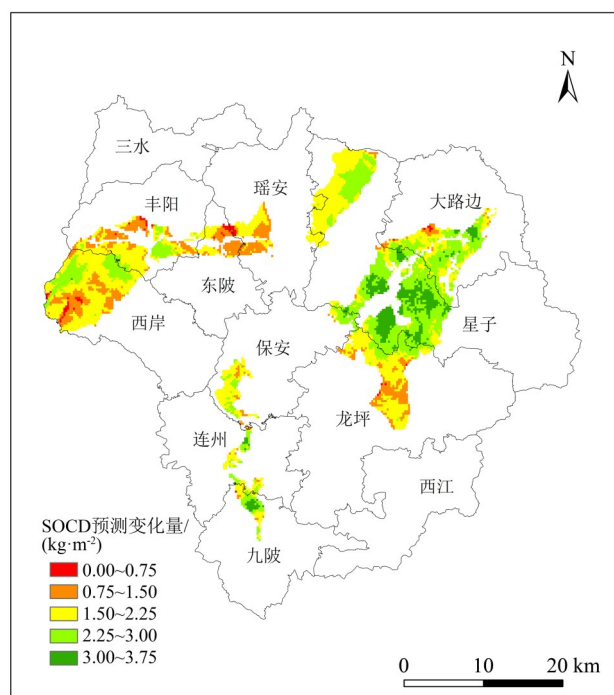


图6 土壤有机碳密度变化量预测分布图

Fig. 6 Predicted distribution map of soil organic carbon density change

裸露土壤易受侵蚀, 导致土壤有机碳的丢失(陈海滨等, 2010)。除此之外, 日间地表温度与土壤有机碳密度存在显著的负相关关系, 这可能是由于随着土壤温度的升高, 土壤呼吸幅度、土壤微生物

物代谢活性、土壤胞外酶活性增强, 土壤有机质的分解速度加快, 从而导致土壤有机碳的损失(黄锦学等, 2017)。

3) 耕地土壤受人类扰动较强。种植制度、灌溉方式、秸秆焚烧与还田等农业条件都会对土壤有机碳密度产生影响。依据采样点信息统计了A、B、C、D区域内耕地主要的农业条件如下表2。灌溉是最常用的农业措施, 主要通过影响土壤水分、土壤团聚体的分布和稳定性、微生物的活动来影响土壤有机碳的密度(逢蕾和黄高宝, 2006)。研究区内水源条件以耕地附近的河流为主, 广泛使用漫灌的灌溉方式, 由于连州雨量时空分布不均匀容易出现连续干旱的气候状况, 土壤灌溉量不足, 妨碍了农作物生长以及土壤有机碳的积累。土地种植制度同样能显著影响土壤有机碳的密度, 在4个红层区中, B区以一年两熟稻-稻的种植制度为主, 其它区域以一年一熟稻的种植制度为主, 有机碳密度在B区下降幅度最大, 这说明B区域的作物从土壤中获取了更多的营养成分, 土壤有机碳的输出量远大于输入量, 土壤肥力不能稳定保持。与秸秆焚烧相比, 秸秆还田既能减少直接排放到空气中的CO₂, 也能为土壤提供有机质, 有利于土壤有机碳的积累, 提高区域内农作物秸秆的综合利用率对土壤有机碳的保持至关重要。

表2 红层区域内耕地主要农业条件

Table 2 Main agricultural conditions of cultivated land in the red beds region

红层区	A	B	C	D
灌溉方式	漫灌, 沟灌	管灌, 漫灌, 沟灌	漫灌, 沟灌, 喷灌	漫灌, 沟灌
水源条件	河流	河流, 泉水	河流, 泉水	河流, 泉水
种植制度	一年两熟稻, 一年一熟蔬菜	一年两熟稻、其他	一年一熟稻、玉米和其他	一年一熟稻、玉米, 一年两熟稻、玉米

4) 合理施肥是提高耕地土壤肥力的关键, 能显著影响土壤有机碳的密度。比较2007年与2019年连州耕地氮肥、磷肥、钾肥折纯数据(连州统计局, 2019)(表3)发现, 近10多年来总施肥量和各氮磷钾施肥量都下降显著, 其原因一方面可能是农

表3 2007和2019年连州施肥数据对比

Table 3 Comparison of fertilization data in Lianzhou in 2007 and 2019

年份	氮肥	磷肥	钾肥	总计
2007	45 357	25 753	10 901	82 011
2019	5 019	2 308	4 321	11 648

业活动中科学施肥的模式得到重视, 另一方面农村耕地存在大量的撂荒问题。计算各年份氮磷钾配比, 2007年氮磷钾比例约为4.5:2.5:1, 而2019年氮磷钾比例约为5.0:2.3:4.3, 可以看出钾肥的使用比例明显增多。通常施加氮磷钾肥能增加土壤的肥力, 有利于土壤有机碳的固存, 但过量的钾肥反而会导致作物吸收其他营养元素能力的下降, 从而限制了土壤有机碳的积累(徐阳春等, 2002)。由此可见, 从2007年到2019年连州红层区耕地的施肥状况发生了较大幅度的变化, 不仅总施肥量下降, 氮磷钾肥料配比也存在一些问题, 土地利

用方式与耕作措施存在改进空间。

总体来看,不同的土壤属性、地形地貌、气候环境、农业条件与土壤有机碳密度的关系存在差异。其中,红层区成土母质有机质含量较低是土壤有机碳初始密度较低的控制因素,高程和日间地表温度则对有机碳的区域分布产生影响。与相对稳定的地形气候等自然因素相比,人类的农业活动对红层区耕地土壤有机碳密度的影响程度更大。不难看出,连州目前还存在灌溉设施薄弱、耕地强度利用高、肥料投入不足和缺少精准施肥等问题,这可能是导致连州红层区耕地土壤有机碳储量从2007年到2019年大幅下降的主要因素。

3.2 土壤固碳潜力分析

饱和值法是农田土壤固碳潜力研究中应用最多的一种方法,需要根据田间长期定位试验的结果计算并外推有机碳逐年变化,从而确定固碳潜力。由于本文中只采用了2019年与2007年两个年份的数据,时间短且不连续,因此无法准确计算土壤有机碳密度真实饱和值,从而低估土壤的固碳潜力。历史数据比较法需要以有机碳密度最高的年份作为基准年,同样由于数据较少,只能以2007年作为历史数据最高年份,低估了土壤固碳潜力。土地利用方式对比法以农业植被恢复到自然植被状况下土壤有机碳的增加量为固碳潜力,缺乏实际经济价值。因此,针对连州红层区耕地土壤可以选用最大值法来计算固碳潜力。2019年土壤有机碳密度最大值为 4.767 kg/m^2 ,据此可估算出当所有区域有机碳密度都达到该最大值时的土壤固碳潜力可达 $9.42 \times 10^8 \text{ kg}$ 。

基于最大值法计算的固碳潜力结果代表了理想状态下土壤有机碳的固持量,推进可持续农业的发展是将其固碳潜力理论值转化为实际土壤固碳能力、提升土壤有机碳储量的关键。针对连州红层区耕地土壤有机碳的流失问题,一方面,要加大农业投入改善农田基本设施,改善水源条件,实现排灌工程系统化、科学化,推广节水型灌溉;另一方面,要加强土地利用管理,减少农田弃耕撂荒,使种植制度与土壤承载力相匹配,降低土壤的超负荷利用,提升农民土壤养护意识;再一方面,要科学使用化肥,结合土壤肥力状况和作物需要合理分配氮磷钾养分,推广冬种绿肥、秸

秆还田利用,增施有机肥,提高土壤有机质含量。

3.3 土壤有机碳密度预测

以最大值法固碳潜力为基准,可对区域内有机碳密度分布趋势进行预测(图6)。绿色代表有机碳密度增加最多的区域,最大增加量可达 $3.00 \sim 3.75 \text{ kg/m}^2$,主要分布于红层区D即星子镇及大路边镇区域内,红色代表有机碳密度增加较小的区域,增加量为 $0 \sim 0.75 \text{ kg/m}^2$,红层区耕地土壤有机碳储量可由2019年的 $1.21 \times 10^8 \text{ kg}$ 逐步升高为 $2.15 \times 10^9 \text{ kg}$ 。

广东省红层分布广泛,面积约为 2.8 万 km^2 ,占全省面积15.7%。省内表层铁铝土红壤的有机碳密度为 2.53 kg/m^2 (罗薇等,2018),与本文中连州红层区有机碳密度平均值 2.67 kg/m^2 结果接近。连州具有广东省典型红层区,因此可以根据广东省农田土壤有机碳饱和水平 4.2 kg/m^2 (韩冰等,2005),估算出广东省范围内红层耕地土壤固碳潜力为 $4.33 \times 10^{10} \text{ kg}$ 。

4 结 论

本文基于2019年与2007年连州红层区耕地土壤实测数据,通过普通克里金插值法估算土壤有机碳密度与储量并分析其分布特征与变化趋势,利用最大值法估算土壤固碳潜力,分析土壤有机碳密度与储量的影响因素,得出以下主要结论:

1) 从2007年到2019年,连州红层区耕地土壤有机碳密度整体呈下降趋势,平均有机碳密度由 4.624 kg/m^2 下降至 2.668 kg/m^2 ,有机碳储量从 $1.99 \times 10^9 \text{ kg}$ 降低为 $1.21 \times 10^9 \text{ kg}$,固碳潜力可达 $9.42 \times 10^8 \text{ kg}$ 。

2) 受红层区成土母质有机质含量影响,红层区土壤有机碳初始密度较低,且土壤有机碳密度与高程变异系数、日间地表温度存在显著的负相关关系,与高程存在先增加后降低的近似抛物线型关系。

3) 红层区耕地土壤有机碳储量大幅下降的主要因为其农业条件存在灌溉设施薄弱、耕地强度利用高、肥料投入不足和缺少精准施肥等问题,通过改善农田基本设施,减少农田弃耕撂荒现象,降低土壤的高强度利用,科学合理施用化肥等措施,可提高连州红层区耕地土壤有机碳储量,促进连州农业绿色低碳可持续性发展。

参考文献:

- 陈东平,张金鹏,聂合飞,等,2021.粤北山区连州土壤硒含量分布特征及影响因素研究[J].环境科学学报,41(7):2838-2848.
- 陈海滨,陈志彪,陈志强,2010.南方红壤侵蚀区地形对土壤有机质空间分布的影响——以长汀县河田地区为例[J].福建农业学报,25(3):369-373.
- 陈留勤,李鹏程,郭福生,等,2019.粤北丹霞盆地晚白垩世丹霞组沉积相及古气候意义[J].沉积学报,37(1):17-29.
- 陈昭,罗小波,高阳华,等,2019.基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析[J].地球信息科学学报,21(7):1051-1060.
- 韩冰,王效科,欧阳志云,2005.中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J].农村生态环境,(4):6-11.
- 韩光中,王德彩,谢贤健,2016.中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究[J].土壤学报,53(1):93-102.
- 黄锦学,熊德成,刘小飞,等,2017.增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J].生态学报,37(1):12-24.
- 解宪丽,孙波,周慧珍,等,2004.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,41(1):35-43.
- 金峰,杨浩,蔡祖聪,等,2001.土壤有机碳密度及储量的统计研究[J].土壤学报,38(4):522-528.
- 李海萍,杜佳琪,唐浩竣,2021.基于随机森林的县域土壤有机碳密度及储量估算[J].中国土壤与肥料,(3):1-8.
- 李龙,姚云峰,秦富仓,等,2014.赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳密度的影响[J].中国水土保持,(3):43-46.
- 李龙,姚云峰,秦富仓,等,2016.半干旱区县域尺度土壤有机碳的空间变异特征[J].生态学杂志,35(8):2003-2008.
- 连州统计局,2019.连州国民经济统计年鉴[E/OL].
http://www.lianzhou.gov.cn/xxgk/tjxx/tjgb/content/post_1153827.html.
- 刘霏珈,吴克宁,罗明,2019.基于数据稳健性的农用地土壤重金属空间分异研究[J].中国土地科学,33(5):86-94.
- 罗薇,张会化,陈俊坚,等,2018.广东省土壤有机碳储量及分布特征[J].生态环境学报,27(9):1593-1601.
- 马利芳,熊黑钢,王宁,等,2019.不同深度土壤盐分和有机质含量的空间变异特征[J].江苏农业科学,47(16):264-270.
- 潘根兴,曹建华,周运超,2000.土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J].第四纪研究,20(4):325-334.
- 逢蕾,黄高宝,2006.不同耕作措施对旱地土壤有机碳转化的影响[J].水土保持学报,(3):110-113.
- 任向宁,王璐,林赋英,等,2021.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[J].农业资源与环境学报,38(6):967-979.
- 师晨迪,曹婷婷,刘洋洋,2019.土壤固碳潜力估算方法研究进展[J].湖北农业科学,58(S1):4-6.
- 孙文娟,黄耀,张稳,等,2008.农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题[J].地球科学进展,23(9):996-1004.
- 王成善,曹珂,黄永建,2009.沉积记录与白垩纪地球表层系统变化[J].地学前缘,16(5):1-14.
- 肖丹,石万忠,王任,等,2015.中国陆相红层有机碳含量控制因素——以北黄海盆地白垩纪红层为例[C]//2015年全国沉积学大会.武汉.
- 谢军,魏伟,莫崇勋,2019.变化环境背景下连州降雨变化特征分析[J].广西大学学报(自然科学版),44(4):1177-1183.
- 徐阳春,沈其荣,冉炜,2002.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,39(1):89-96.
- 赵其国,1997.土壤圈在全球变化中的意义与研究内容[J].地学前缘,4(2):153-162.
- 郑姚闽,牛振国,宫鹏,等,2013.湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计[J].科学通报,58(2):170-180.
- 中华人民共和国农业部,1988.土壤有机质测定法 NY/T 85-1988[S].北京:中国标准出版社.
- 周金霖,黄阳,陈佳婧,等,2015.重庆市农田土壤有机碳时空变化与固碳潜力分析[J].环境科学学报,35(11):3647-3654.
- BOHN H L, 1976. Estimate of organic carbon in world soils [J]. Soil Science Soc Amer J, 40(3):468-470.
- DORJI T, ODEH I O A, FIELD D J, et al, 2014. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas[J]. For Ecol Manag, 318:91-102.
- LIU Z P, SHAO M A, WANG Y Q, 2013. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China [J]. Geoderma, 197/198:67-78.
- MORISADA K, ONO K, KANOMATA H, 2004. Organic carbon stock in forest soils in Japan [J]. Geoderma, 119(1/2):21-32.
- MUELLER T G, PIERCE F J, 2003. Soil carbon maps [J]. Soil Science Soc Amer J, 67(1):258-267.
- ROSS C W, GRUNWALD S, MYERS D B, et al, 2016. Land use, land use change and soil carbon sequestration in the St. Johns River Basin, Florida, USA [J]. Geoderma Reg, 7(1):19-28.
- RUBEY W W, 1951. Geologic history of sea water [J]. Geol Soc America Bull, 62(9):1111.
- YAO X, YU K, DENG Y, et al, 2019. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in Masson pine (*Pinus massoniana*) forests in subtropical China [J]. CATENA, 178:189-198.

(责任编辑 秦社彩)