

doi: 10.12029/gc20230505002

鲍丽然, 李瑜, 张风雷, 岳甫均, 罗恺, 邓海, 严明书. 2024. 重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献[J]. 中国地质, 51(5): 1501–1512.

Bao Liran, Li Yu, Zhang Fenglei, Yue Fujun, Luo Kai, Deng Hai, Yan Mingshu. 2024. Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China[J]. Geology in China, 51(5): 1501–1512(in Chinese with English abstract).

重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对 碳减排的贡献

鲍丽然¹, 李瑜¹, 张风雷^{1,2}, 岳甫均³, 罗恺¹, 邓海¹, 严明书¹

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400030; 2. 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400044; 3. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072)

摘要:【研究目的】土壤碳汇和岩溶碳汇共同构成自然地质碳汇, 土壤中的碳参与碳循环的主要形式是有机碳。因此, 土壤有机碳研究对提升土壤碳汇、实现“双碳”目标具有重要意义。【研究方法】基于多目标区域地球化学调查数据, 利用地统计学方法分析了重庆市表层土壤有机碳密度空间分布, 应用单因素方差分析及分类回归树法研究了土壤有机碳密度影响因素及其重要性, 采用模型法评估了农田土壤固碳减排潜力。【研究结果】研究区表层土壤有机碳平均密度为 2.75 kg/m², 空间分布上具有中等程度空间自相关性, 呈现南北两端高、中间低的分布格局。海拔、温度、土壤类型是影响有机碳密度的重要因素, 降雨量、土地利用方式次之。农田土壤固碳潜力约为 36.88 Tg C, 相当于 2018 年重庆市能源消耗碳排放量的 24.10%。【结论】重庆市凉爽湿润的高海拔区表层土壤有机碳密度较大; 不同土地利用方式中林草地、水田更利于土壤有机碳的积累。在达到碳平衡之前, 农田土壤整体呈“碳汇”效应, 吸收着空气中的碳。

关键词: 土壤有机碳; 空间分布; 碳减排; 地统计学; 环境地质调查工程

创新点: 基于多目标区域地球化学调查数据, 探讨重庆市土壤有机碳密度影响因素及其重要性, 评估农田土壤固碳减排潜力。

中图分类号: P595; X144; S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1501-12

Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China

BAO Liran¹, LI Yu¹, ZHANG Fenglei^{1,2}, YUE Fujun³, LUO Kai¹, DENG Hai¹, YAN Mingshu¹

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400030, China; 2. School of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Earth Systems Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Natural geological carbon sinks mostly consist of soil and karst carbon sinks, and the main form of carbon's participation in the carbon cycle in soil is organic carbon. Therefore, the study of topsoil organic carbon has great significance for

收稿日期: 2023-05-05; 改回日期: 2023-07-19

基金项目: 重庆市地质矿产勘查开发局 2022 年度科研项目(DKJ-2022-208-B-001)资助。

作者简介: 鲍丽然, 女, 1983 年生, 硕士, 正高级工程师, 主要从事土地质量地球化学评价研究工作; E-mail: blr1999@163.com。

increasing soil carbon sink and achieving the "carbon peaking and carbon neutrality" goal. **[Methods]** Based on the data of a multi-objective regional geochemical survey, this paper analyzed the spatial distribution of topsoil organic carbon density in Chongqing with the geostatistical method, studied the influencing factors and importance of soil organic carbon density by one-way ANOVA and classification regression tree and evaluated the carbon sequestration and emission reduction potential of the farmland soil with the model approach. **[Results]** The average density of topsoil organic carbon in the study area was 2.75 kg/m², and the spatial distribution had a moderate degree of spatial autocorrelation, showing a distribution pattern of being high at the north and south ends and low in the middle. Altitude, temperature and soil type were the main factors affecting the organic carbon density, followed by precipitation and land use method. The carbon sequestration potential of farmland topsoil was about 36.88 Tg C, equivalent to 24.10% of Chongqing's carbon emissions from energy consumption in 2018. **[Conclusions]** The soil organic carbon density was relatively high in cool and humid high-altitude areas, in Chongqing; and forests, grasslands, and paddy fields can help with the accumulation of soil organic carbon among different land use methods. Before the carbon balance is achieved, the farmland soil, has a "carbon sink" effect as a whole, absorbing carbon from the air.

Key words: soil organic carbon; spatial distribution; carbon emission reduction; geostatistics; environmental geological survey engineering

Highlights: Based on the data of multi-objective regional geochemical survey, this paper studied the influencing factors and importance to soil organic carbon density, and assessed the potential for carbon sequestration and emission reduction of the farmland topsoil.

About the first author: BAO Liran, female, born in 1983, master, professor level senior engineer, engaged in research on geochemistry evaluation of land quality; E-mail: blr1999@163.com.

Fund support: Supported by Scientific Research Project of Chongqing Geological and Mineral Exploration and Development Bureau in 2022 (No. DKJ-2022-208-B-001).

1 引 言

土壤有机碳是土壤重要的组成部分, 不仅与土壤肥力密切相关, 而且对地球碳循环与全球气候变化有巨大的影响, 它既是温室气体的“源”, 也是重要的“汇”(黄巧云等, 2015)。全球土壤有机碳库总储量约为 1500 Pg, 相当于大气中碳含量的 2 倍, 其细微的变化会导致大气 CO₂ 浓度显著变化(Post et al., 1982)。因此, 土壤有机碳在调节全球碳平衡和减缓碳排放方面具有重要的作用, 受到国内外学者的广泛关注。

有机碳密度受多种因素影响, 如气候、海拔、地形、土壤理化性质、成土母质、土地利用方式等。Ajami et al.(2016)分析了伊朗北部 Toshan 流域人类活动和地形对土壤有机碳密度的影响, 结果表明, 森林砍伐和农业活动会导致表层土壤有机碳密度显著下降, 从地形看平缓区域土壤有机碳密度较高。刘庆宇等(2023)基于青海省东部地区多目标区域地球化学调查数据, 分析了表层土壤有机碳总储量及密度影响因素, 发现海拔、气候及成土母质均会对土壤有机碳密度及分布规律产生影响。李海

燕等(2024)探讨了容县耕地土壤有机碳分布及其影响因素, 发现土壤有机碳密度整体呈现西南低、东北高的分布格局, 与含水量、全氮正相关, 与土壤 pH 负相关。杨亦恂等(2022)对三江平原土壤有机碳密度影响因素的研究发现, 土壤类型和土地利用方式对三江平原有机碳密度有显著影响, 黑土有机碳密度高于其他土类, 林草地有机碳密度高于耕地。周双(2016)在南方丘陵区, 通过建立预测模型对土壤有机碳密度影响因子重要性进行排序, 得出排序前三因子为: 土壤类型、土地利用方式、海拔。

在土壤固碳减排方面, 王浩成等(2024)梳理了中国农田固碳潜力研究的相关文献, 得出总体来看中国农田土壤有较大的固碳潜力。周萌等(2024)利用最大值法, 估算出广东省清远市西北部红层区耕地表层土壤固碳潜力为 0.92 Tg C (“C”表示以碳计, 下同)。郭晶晶(2015)利用覃章才模型, 估算了长江流域典型区农田土壤对碳减排的贡献。刘国栋等(2014)根据第二次土壤普查和多目标区域地球化学调查两期数据, 估算了松嫩平原南部土壤碳源、汇潜力, 对减缓全球温室效应具有重要意义。杨柯(2016)基于多目标地球化学调查数据, 估算全

国 9 省耕地表层土壤固碳潜力为 454 Tg C, 相当于我国 2010 年固体化石燃料燃烧释放碳总量的 27.75%, 对削减 CO₂ 具有重要的意义。

重庆地区土壤有机碳研究大多是基于第二次土壤普查资料(倪九派等, 2009; 周金霖等, 2015), 该项工作距今已 40 余年, 数据很难准确反映当前土壤有机碳特征, 且土壤有机碳密度影响因素的研究鲜见报道。因此, 本研究利用重庆市近年多目标区域地球化学调查数据, 探究土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献, 以期重庆市土壤固碳减排提供理论依据, 助力“双碳”目标。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况

重庆市位于四川盆地东南部、长江上游地区, 地理坐标介于 105°17'E~110°11'E、28°10'N~32°13'N, 东与湖北省、湖南省接壤, 南邻贵州省, 西与四川省毗邻, 北连陕西省, 幅员面积 8.24 万 km², 下辖 38 个区县。地跨扬子陆块、南秦岭—大别山造山带两大构造单元; 沉积岩广泛发育, 地层出露较齐全, 从新元古界青白口系至第四系均有分布。地貌受地质构造控制, 背斜成山, 向斜成谷, 总体以丘陵、山地为主; 地势呈东南部、东北部高, 中部和西部低, 由南北向长江河谷逐级降低。重庆市属亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 17.8℃, 年平均降水量 1000~1350 mm。水域面积较广, 河流总属长江水系, 分属长江上游干流、嘉陵江、乌江、沱江等。土壤类型包括水稻土、紫色土、黄壤、石灰土、黄棕壤、棕壤等, 其中, 紫色土、水稻土和黄壤分布面积较大。土地利用方式多样, 以耕地和林地为主, 分别占土地总面积的 36.40% 和 46.72%。

2.2 样品采集与分析

2005—2018 年, 重庆市逐步开展了 1:25 万多目标区域地球化学调查, 截至目前, 调查总面积 5.67 万 km², 覆盖重庆中西部、东南部以及东北沿江地区。按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T0258—2014)要求, 网格化采集表层土壤样品, 采样密度为 1 个点/km², 采样深度为 0~20 cm, 在采样点周围 100 m 范围内 3~5 处多点采集, 各分样点充分混合后, 四分法留取 1.0~1.5 kg 作为 1 件单点样。土壤样品风干、敲碎后过

20 目尼龙筛, 将 4 km² 大格内样品等重量组合为一个分析样, 全区表层土壤组合分析样共 14209 件。

样品测试由国土资源部合肥矿产资源监督检查中心按《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005—03)执行, 土壤有机碳采用重铬酸钾容量法分析, 检出限 0.05%, 报出率 100%, 合格率 100%。

2.3 数据来源与处理

2.3.1 土壤有机碳密度计算

土壤碳密度指每平方米内土壤碳含量, 计算公式如下(奚小环等, 2009):

$$\text{SOC}_D = D \times \rho \times C \div 10 \quad (1)$$

式中: SOC_D 表示土壤有机碳密度, kg/m²; *D* 表示采样深度, cm; *C* 表示土壤有机碳含量, %; ρ 表示土壤容重, g/cm³, 土壤容重数据来自《四川土壤》(四川省农牧厅和四川省土壤普查办公室, 1997)。

2.3.2 农田土壤有机碳固碳潜力评估

采用覃章才模型(覃章才和黄耀, 2010)估算研究区农田表层土壤固碳潜力。该模型可以计算在当前环境不变的情况下农田土壤有机碳密度能达到的最大饱和值, 由气温、降水、土壤黏粒含量和 pH 值建立, 计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{SOC}_{D_B} = & (140.5 \times e^{-0.021 \times \text{MT}} - 98.8 \times e^{-0.42 \times \text{MP}} - \\ & 39.6 \times e^{-0.10 \times \text{CL}} - 4.1 \times \text{pH} - 27.7) \times 10^{-1} \\ & (R^2 = 0.58, n = 76) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{SOC}_{D_P} = \text{SOC}_{D_B} - \text{SOC}_{D_0} \quad (3)$$

式中: MT 表示年平均气温, °C; MP 表示年平均供水量, 100 mm; CL 表示土壤黏粒含量, %; pH 表示土壤 pH 值; SOC_{D_B} 表示饱和水平土壤有机碳密度, kg/m²; SOC_{D₀} 表示当前土壤有机碳密度, kg/m²; SOC_{D_P} 表示有机碳密度增长潜力, kg/m²; 单位面积(4 km²)的 SOC_{D_P} 累计加和得到全区农田土壤有机碳固碳潜力。

2.3.3 地统计分析

地统计分析借助半变异函数来描述区域土壤要素的空间变异性, 可以量化结构性因素(自然因素)和随机性因素(人为因素)对区域化变量的影响程度。半变异函数计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (4)$$

式中: $\gamma(h)$ 表示间距为 h 时的半方差; $N(h)$ 表示间距为 h 的所有样点的点对数; $Z(x_i+h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别表示变量在位置 x_i+h 和 x_i 处的实测值。

半变异函数的参数中, 块金值(C_0)、结构方差(C)和基台值(C_0+C)分别表示随机变异、结构变异和系统内总的变异。块基比($C_0/(C_0+C)$)表示随机变异在总空间变异中的占比, 比值高说明随机部分(土地利用方式、耕作制度等人为因素)引起的空间变异程度较大; 相反, 则由结构性因素(气候、地形地貌、土壤类型等自然因素)引起的空间变异性程度较大(刘爱利等, 2012)。 $C_0/(C_0+C) < 25\%$, 说明变量具有强烈的空间相关性; $25\% \sim 75\%$, 说明变量具有中等的空间相关性; $C_0/(C_0+C) > 75\%$, 说明变量空间相关性小(Cambardella et al., 1994)。

2.3.4 其他数据来源

高程、土地利用方式、土壤黏粒含量、pH 值数据来自于多目标区域地球化学调查, 项目野外调查详细记录了采样点高程、土地利用及土壤黏粒情况, 并分析测试土壤 pH 值; 坡度由 DEM 数据提取, 利用 ArcGIS 表面分析工具生成坡度栅格图, 然后值提取至点; 土壤类型数据来自于第二次全国土壤普查; 气候数据来自重庆市区县统计年鉴。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳密度空间分布特征

3.1.1 土壤有机碳密度一般统计分析

通过一般统计分析, 得出研究区表层土壤有机碳密度基本特征参数(表 1)。有机碳密度变化范围为 $0.07 \sim 23.3 \text{ kg/m}^2$, 平均值为 2.75 kg/m^2 , 变异系数为 0.49, 属于中等变异。偏度系数为 3.49, 呈现正

偏态分布, 平均值高于中位值, 说明有机碳密度低值数据较多, 经对数转换后偏度和峰度分别为 0.051 和 1.80, 基本符合正态分布。与中国典型地区相比(奚小环等, 2010), 该区高于西北(2.26 kg/m^2)和华北地区(2.22 kg/m^2), 低于西南成都平原(4.22 kg/m^2)、中南洞庭湖地区(3.96 kg/m^2)和东北松辽平原(3.44 kg/m^2)。

3.1.2 土壤有机碳密度空间分布与变异特征

应用 GS+9.0 软件对土壤有机碳密度进行半变异函数分析, 按照 R^2 接近于 1, RSS 值趋近于 0 的原则, 选取最佳拟合模型。通过对比球状模型、指数模型、线状模型和高斯模型参数发现, 球状模型 R^2 最接近 1, RSS 值最接近 0, 故球状模型为最佳拟合模型(表 2, 图 1)。该模型下土壤有机碳密度的块金值和基台值分别为 0.97 和 2.03, 块基比为 47.78%, 介于 $25\% \sim 75\%$, 低于 50%, 表明研究区表层土壤有机碳密度在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, 受结构性因素影响作用略大。变程是半变异函数达到平稳基台处的距离, 只有在变程以内的变量才具有空间自相关性。研究区变程为 150 m, 表明土壤有机碳密度在此范围内存在空间自相关性, 较北方平原区变程低, 说明该区土壤有机碳空间分布更加破碎(杨安广等, 2015; 孙喜军等, 2022)。

基于半变异函数模型, 对研究区表层土壤有机碳密度进行克里金插值, 绘制土壤有机碳密度空间分布图(图 2)。总体来看, 土壤有机碳密度空间分布大体呈现北部、东南部高, 中部低的趋势。土壤有机碳密度大于 3.80 kg/m^2 的高值区成片分布于黔江区、酉阳县、秀山县、开州区北部、南川区南部、綦

表 1 研究区表层土壤有机碳密度基本特征

Table 1 Basic characteristics of topsoil organic carbon density in the study area

指标	样本数/件	最小值/(kg/m^2)	最大值/(kg/m^2)	平均值/(kg/m^2)	中位值/(kg/m^2)	标准差/(kg/m^2)	变异系数	偏度	峰度
有机碳密度	14209	0.07	23.3	2.75	2.45	1.36	0.49	3.49	26.5
对数转换								0.051	1.80

表 2 研究区表层土壤有机碳密度半变异模型及参数

Table 2 Semi-cutting model and parameters of topsoil organic carbon density in the study area

模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块基比 ($C_0/(C_0+C)$) /%	变程/m	残差RSS	决定系数 R^2
球状模型	0.97	2.03	47.78	150	0.261	0.826
指数模型	0.83	2.02	41.05	153	0.323	0.783
线状模型	1.39	2.15	65.05	239	0.745	0.499
高斯模型	1.01	2.02	49.98	114	0.309	0.818

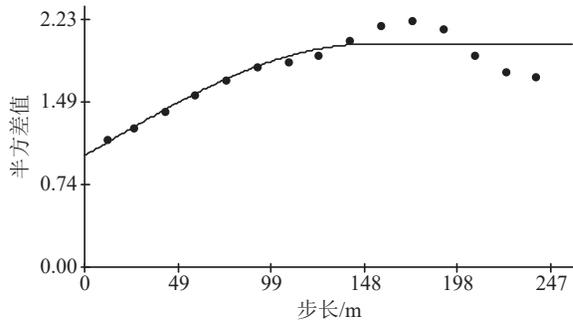


图 1 表层土壤有机碳密度半变异函数图
Fig.1 Semivariogram of topsoil organic carbon density

江区东南部, 条带状分布于大足区、铜梁区、合川区等, 分布面积 0.86 万 km²; 低于 2.01 kg/m² 的低值区主要呈点块状分布于长江两岸的江津区、涪陵区、丰都县、万州区、云阳县等, 分布面积 1.68 万 km²。

3.2 土壤有机碳密度影响因素

3.2.1 气候对土壤有机碳密度的影响

研究区年均气温 ≤16 °C、16~17 °C、17~18 °C

和 >18 °C 时, 土壤有机碳密度分别为 3.70 kg/m²、2.83 kg/m²、2.57 kg/m² 和 2.33 kg/m², 随着温度的升高而明显降低。单因素方差分析结果(图 3a)显示, 不同温度范围土壤有机碳密度均呈现显著性差异。年均降雨量 ≤1100 mm、1100~1200 mm、1200~1300 mm 和 >1300 mm 时, 土壤有机碳密度分别为 2.56 kg/m²、2.76 kg/m²、2.90 kg/m² 和 2.91 kg/m², 随着降雨量的增大而逐渐升高, 降雨量 ≤1100 mm 和 1100~1200 mm 的土壤有机碳密度显著低于其他降雨量土壤有机碳密度, 降雨量 1200~1300 mm 和 >1300 mm 土壤有机碳密度差异不显著, 但显著高于其他降雨量土壤有机碳密度(图 3b)。

3.2.2 地形对土壤有机碳密度的影响

研究区海拔为 ≤300 m、300~500 m、500~800 m、800~1000 m 和 >1000 m 时, 有机碳密度分别为 2.26 kg/m²、2.53 kg/m²、2.87 kg/m²、3.22 kg/m² 和 4.14 kg/m², 随着海拔的升高而明显增加,

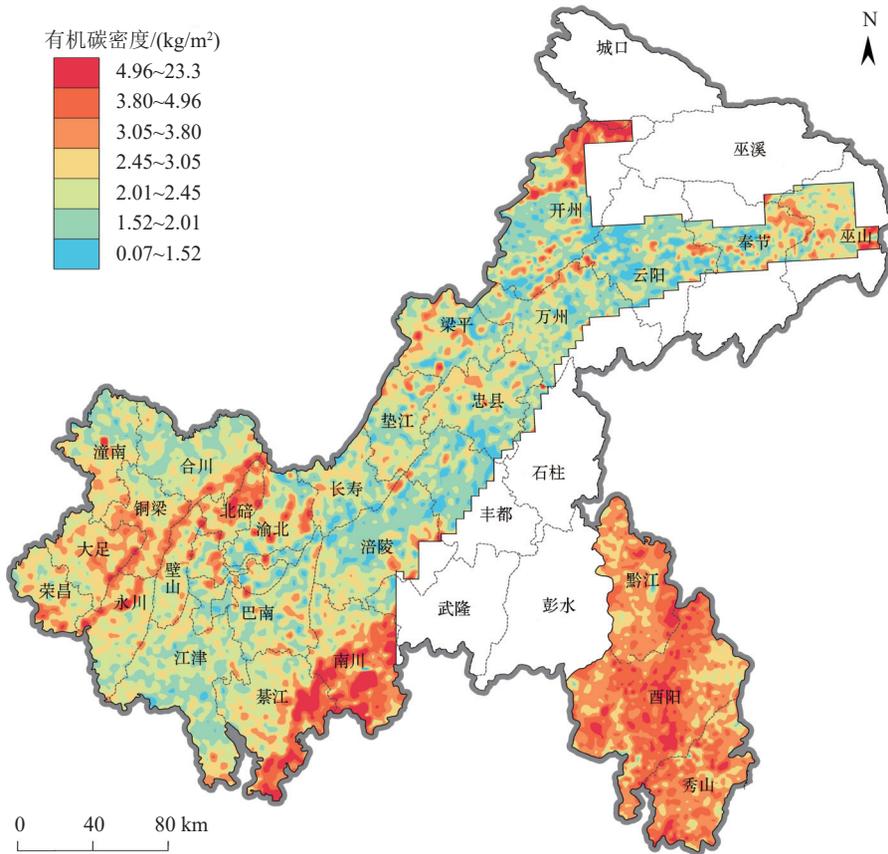


图 2 表层土壤有机碳密度空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of topsoil organic carbon density

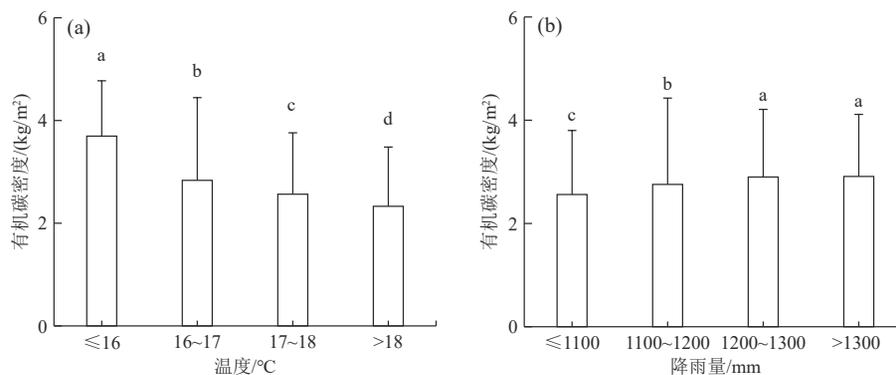


图3 不同温度(a)和降雨量(b)对表层土壤有机碳的影响

条柱上小写字母表示差异显著性(下同)

Fig.3 Effect of different temperature (a) and precipitation (b) on topsoil organic carbon density
Small letters on the bar denote significant differences among different groups (The same below)

不同海拔范围土壤有机碳密度均呈现显著性差异(图4a)。坡度 $\leq 5^\circ$ (平坡)、 $5^\circ\sim 15^\circ$ (缓坡)、 $15^\circ\sim 25^\circ$ (斜坡)、 $25^\circ\sim 35^\circ$ (陡坡)和 $>35^\circ$ (急坡)时,土壤有机碳密度分别为 2.58 kg/m^2 、 2.62 kg/m^2 、 2.93 kg/m^2 、 3.03 kg/m^2 和 3.54 kg/m^2 ,随着坡度的增大呈升高趋势(图4b)。坡度 $>35^\circ$ 的土壤有机碳密度显著高于其他坡度;坡度 $15^\circ\sim 25^\circ$ 和 $25^\circ\sim 35^\circ$ 土壤有机碳密度无显著性差异,但两者显著高于较缓坡度。

3.2.3 土壤类型、pH值对土壤有机碳密度的影响

紫色土、黄壤、黄棕壤、石灰土、水稻土、潮土、棕壤的土壤有机碳密度分别为 2.28 kg/m^2 、 3.36 kg/m^2 、 4.74 kg/m^2 、 3.50 kg/m^2 、 2.65 kg/m^2 、 3.08 kg/m^2 和 4.01 kg/m^2 。黄棕壤土壤有机碳密度最大,且显著高于其余6种土壤类型;棕壤次之,且显著高于其余5种土壤类型;石灰土有机碳密度显著高于黄壤、潮土、水稻土及紫色土;黄壤、潮土、水稻土有机碳密度之间差异不显著,但显著高于紫色土;紫

色土有机碳密度显著低于其他土壤类型(表3)。研究区表层土壤有机碳密度在不同土壤类型之间的差异与成都平原研究结论类似(奚小环等,2010),黄雪夏等(2005)基于第二次土壤普查数据也发现重庆市棕壤、黄棕壤有机碳密度较高,紫色土有机碳密度最低。

土壤 $\text{pH}\leq 5.0$ (强酸性)、 $5.0\sim 6.5$ (酸性)、 $6.5\sim 7.5$ (中性)、 $7.5\sim 8.5$ (碱性)和 $\text{pH}>8.50$ (强碱性)时,土壤有机碳密度平均值分别为 3.03 kg/m^2 、 2.81 kg/m^2 、 2.83 kg/m^2 、 2.55 kg/m^2 和 1.66 kg/m^2 ,强酸性环境土壤有机碳密度显著高于其他环境,碱性和强碱性环境土壤有机碳密度显著低于其他环境,酸性和中性土壤有机碳密度之间差异不显著(表4)。土壤理化性质中的pH值会影响微生物的活性,酸性土壤中微生物活性较弱,减缓土壤有机碳矿化;碱性环境土壤中微生物活性增强,加速土壤有机碳矿化(唐敏,2019)。

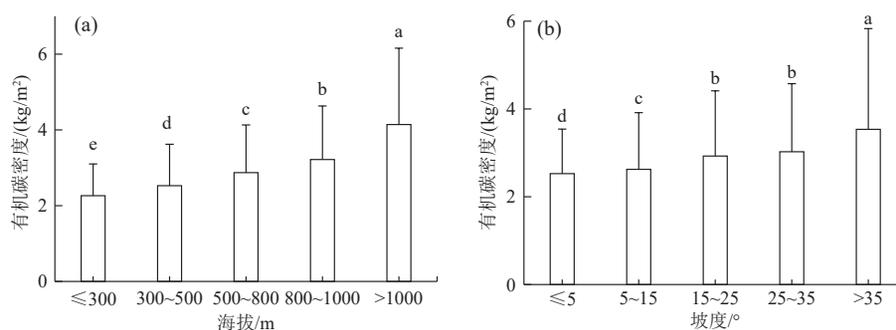


图4 不同海拔和坡度对表层土壤有机碳的影响

Fig.4 Effect of different altitude and slope on topsoil organic carbon density

表 3 不同土壤类型对表层土壤有机碳密度的影响
Table 3 Effect of different soil types on topsoil organic carbon density

土壤类型	样品数/件	土壤有机碳密度/(kg/m ²)				变异系数
		最小值	最大值	平均值	标准差	
紫色土	6893	0.07	19.60	2.28e	0.97	0.43
黄壤	3384	0.43	23.26	3.36d	1.47	0.44
黄棕壤	94	1.10	15.47	4.74a	2.90	0.61
石灰土	1409	0.08	20.50	3.50c	1.96	0.56
水稻土	2339	0.07	14.31	2.65d	1.02	0.39
潮土	21	0.81	5.03	3.08d	1.02	0.33
棕壤	69	2.07	9.77	4.01b	1.64	0.41

注：“平均值”列字母表示差异显著性。下同。

3.2.4 土地利用方式对土壤有机碳密度的影响

不同土地利用方式旱地、水田、园地、林地、草地、建设用地和滩涂等地的土壤有机碳密度分别为 2.53 kg/m²、2.65 kg/m²、2.66 kg/m²、3.21 kg/m²、2.87 kg/m²、2.35 kg/m² 和 2.25 kg/m²(表 5)。林地土壤有机碳密度最大,且显著高于其余 6 种用地方式;草地次之,且显著高于其余 5 种用地方式;水田和园地土壤有机碳密度之间差异性不显著;旱地、建设用地以及滩涂等地有机碳密度之间差异不显著,但显著低于其他用地方式。郭晶晶(2015)在研究长江流域典型地区不同用地方式表层土壤有机碳密度时也得出相似的结论:草地>林地>水田>旱地>滩涂。

3.3 各因素对土壤有机碳密度影响重要性

研究区表层土壤有机碳密度与温度、降雨量、

海拔、坡度、土壤 pH 值等密切相关,通过相关分析(表 6)得出,有机碳密度与海拔、坡度、降雨量极显著正相关,与温度、pH 值极显著负相关。应用分类回归树法(张云逸, 2020),将温度、降雨量、海拔、坡度、土壤类型、土壤 pH 值、用地方式等因子作为测试变量,土壤有机碳密度作为目标变量,计算各因子的相对重要性,土壤有机碳密度实测值与预测值相关系数为 0.791,说明获得的模型具有较高的拟合度。结果(图 5)显示,海拔(48%)、温度(39%)和土壤类型(31%)对于有机碳密度的影响重要性较高,降雨量(19%)、土地利用方式(12%)和土壤 pH 值(9%)重要性较低,坡度(7%)的重要性最低。

不同地理区域土壤有机碳密度主导控制因素不尽相同。福建表层土壤有机碳密度影响因素重要性排序为:降雨量>海拔>土壤 pH>地貌>土壤类

表 4 不同土壤 pH 对表层土壤有机碳密度的影响
Table 4 Effect of different soil pH on topsoil organic carbon density

土壤pH	样品数/件	土壤有机碳密度/(kg/m ²)				变异系数
		最小值	最大值	平均值	标准差	
≤5.0	1069	0.07	20.12	3.03a	1.63	0.54
5.0~6.50	5901	0.27	20.50	2.81b	1.34	0.48
6.50~7.50	2878	0.41	21.83	2.83b	1.50	0.53
7.50~8.50	4276	0.14	23.26	2.55c	1.21	0.48
>8.50	85	0.53	3.06	1.66d	0.56	0.34

表 5 不同土地利用方式对表层土壤有机碳密度的影响
Table 5 Effect of different land use methods on topsoil organic carbon density

用地方式	样品数/件	土壤有机碳密度/(kg/m ²)				变异系数
		最小值	最大值	平均值	标准差	
旱地	6453	0.07	17.64	2.53d	1.13	0.44
水田	2406	0.36	14.31	2.65c	1.03	0.39
园地	290	0.08	7.49	2.66c	1.00	0.42
林地	3986	0.30	23.26	3.21a	1.80	0.56
草地	437	0.41	7.72	2.87b	1.27	0.44
建设用地	407	0.38	7.48	2.35d	1.09	0.44
滩涂等地	230	0.38	9.16	2.25d	1.12	0.50

表6 表层土壤有机碳密度与各影响因素相关分析

Table 6 Pearson correlation of the influencing factors and topsoil organic carbon density

	温度	降雨量	海拔	坡度	pH值
相关系数	-0.342**	0.156**	0.420**	0.163**	-0.101**
显著性(双侧)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

型>作物类型(程金等, 2023); 东北地区旱地土壤有机碳密度的主要自然影响因子是温度和土壤质地(王丹丹等, 2009)。

3.4 农田土壤有机碳固碳潜力评估

覃章才模型是根据不同气候区农田土壤长期的定位试验数据建立的, 因此本文仅分析农田土壤固碳潜力。将研究区农田土壤有机碳密度饱和水平和增长潜力, 分别乘以单位面积(4 km²), 并累计加和得到土壤有机碳达到饱和水平时的碳储量和

土壤固碳潜力估算量(表7)。达到饱和状态时, 土壤有机碳密度平均值为 3.56 kg/m², 总储量 126.08 Tg C。农田土壤有机碳密度增长潜力平均值为 1.04 kg/m², 总固碳潜力为 36.88 Tg C。从各区县固碳潜力总量看, 江津、合川、梁平、涪陵等固碳潜力较大, 主城区大渡口、沙坪坝、江北、北碚、南岸等固碳潜力较低。从有机碳密度增长看, 梁平、长寿、涪陵、江津、垫江、合川等较大, 北碚、铜梁、潼南、大足、沙坪坝等较低。因此, 在达到新的碳平衡之前, 江津、合川、梁平、涪陵是潜力较大的碳汇区。

4 讨论

近年来地质碳汇越来越引起重视, 它是通过各种途径和手段, 将大气中的 CO₂ 转移固定到地质系统的过程。根据地质系统中 CO₂ 储存库的不同, 地质碳汇可分为地下岩层碳封存、土壤碳汇和岩溶碳汇(杨卫东等, 2023)。其中土壤碳汇又分为土壤有机碳汇、土壤无机碳汇两种形式, 土壤有机碳周转更新周期较短, 是与大气成分进行活性交换的主要部分。因此, 土壤有机碳密度影响因素研究对实

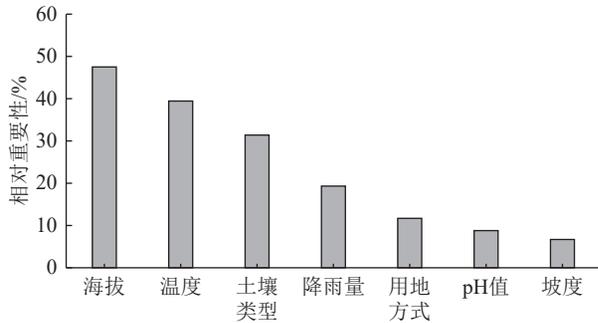


图5 表层土壤有机碳密度预测重要性

Fig.5 Predictive importance of topsoil organic carbon density

表7 农田表层土壤有机碳固碳潜力

Table 7 Carbon sequestration potential of the farmland topsoil

区县	饱和水平		固碳潜力		区县	饱和水平		固碳潜力	
	平均密度	储量	平均密度	储量		平均密度	储量	平均密度	储量
巴南	3.47	4.99	1.22	1.76	綦江	3.69	8.33	0.46	1.03
北碚	3.49	2.1	0.3	0.18	黔江	4.44	3.59	1.21	0.98
璧山	3.55	2.46	1.04	0.72	荣昌	3.6	3.54	0.96	0.95
大渡口	2.85	0.17	1.06	0.06	沙坪坝	3.25	0.88	0.59	0.16
大足	3.26	4.15	0.42	0.53	铜梁	3.16	3.57	0.40	0.45
垫江	3.59	4.13	1.35	1.55	潼南	2.77	4.13	0.40	0.59
丰都	3.24	2.57	1.34	1.06	万州	3.37	3.72	1.32	1.46
奉节	3.8	1.28	1.33	0.45	巫山	2.95	0.95	0.41	0.13
涪陵	3.46	7.78	1.4	3.14	秀山	4.43	3.29	1.03	0.77
合川	3.48	7.72	1.23	2.74	永川	3.73	4.85	1.26	1.63
江北	3.48	0.49	1.21	0.17	酉阳	4.29	6.2	0.75	1.08
江津	3.47	9.07	1.37	3.59	渝北	3.63	4.6	1.15	1.46
九龙坡	3.39	0.91	1.25	0.33	云阳	3.15	2.33	1.33	0.98
开州	3.55	6.5	1.1	2.02	长寿	3.61	4.41	1.47	1.8
梁平	3.73	5.38	1.47	2.12	忠县	3.27	4.03	1.04	1.29
南岸	3.34	0.57	1.11	0.19	其他	3.71	0.86	1.55	0.36
南川	4.12	6.54	0.72	1.14	总计	3.56	126.08	1.04	36.88

注: 平均密度单位为 kg/m², 储量单位为 Tg C; 表中“其他”是指本次研究区涉及面积很小的城口县、石柱县、巫溪县和武陵区。

现土壤增汇减排及地质碳汇助力“碳中和”有重要意义。

4.1 自然因素对土壤有机碳密度影响分析

自然因素包括气候、地形条件、土壤理化性质等,关于土壤有机碳与自然影响因素的研究较多,取得了较大成果。

研究区土壤有机碳密度与气候因子温度极显著负相关,随温度的升高而降低;与降雨量极显著正相关,随降雨量的增大而升高;这与福建省、贵州省(程金等, 2023; 文鑫等, 2023)研究结果一致。温度和水分对土壤有机碳的输入和分解起重要作用,二者决定了植被的分布与生长,影响凋落物的性质,从而决定输入土壤有机碳的数量和性质(杨忠芳等, 2011; 常小峰等, 2013)。气温升高促进土壤微生物生长,加快土壤有机碳分解,研究发现温度每升高 10℃,土壤有机碳分解速率将会提高 16 倍(吕元春和许鹏程, 2012; Wang et al., 2016)。降雨量加大时,土壤水分充足而透气性差,原有机碳不易矿化,外源有机残体易于腐烂降解成小分子有机物质,减缓土壤有机碳分解(杨忠芳等, 2011)。

地形因子中的海拔对温度和降雨均有较大影响,研究区低海拔区主要位于渝西北地区、主城区和长江沿岸,年均气温 16.6~18.4℃,年均降雨量 1012~1243 mm;高海拔区主要位于渝东南酉阳县、黔江区、秀山县、南川区南部,渝东北巫山县、开州区北部,年均气温 15.1~16.3℃,年均降雨量 1260~1325 mm。随着海拔的升高,气温降低,降水量增加,因此,土壤有机碳密度与海拔极显著正相关,随着海拔升高而增加;这与严宁珍等(2013)、孔祥斌(2019)研究结果一致。海拔由于结合了温度和降雨量 2 个因素,可能是最具潜力的有机碳影响因子(王秀丽等, 2013)。坡度一般通过影响植被分布、土壤性质等影响土壤有机碳密度(吴昊, 2015)。重庆山地丘陵较多,坡度较陡的地区多为高海拔区且植被覆盖率较高,导致土壤有机碳密度较高。

不同土壤类型具有不同的成土条件、矿物组成、土壤质地、土壤 pH 等理化特性,故土壤有机碳的积累速率也不同(王文俊, 2012)。研究区棕壤和黄棕壤黏土矿物以蛭石、伊利石、绿泥石为主,其次为蒙脱石,2:1 型矿物占主要地位;土壤质地黏重,黏粒含量较高;土壤结构呈团粒状(四川省农牧厅和

四川省土壤普查办公室, 1997)。研究表明,相比于 1:1 型、2:1 型黏土矿物颗粒较小,比表面积、内表面积较大,因此对有机碳固定能力较强,能够增大其在土壤中的储存(黄昌勇, 2000);有机碳含量与土壤黏粒含量间呈显著正相关关系(杨忠芳等, 2011);土壤团粒具有水稳性和力稳性,土体结构稳定也利于有机碳的储存。加之这两种土壤分布于海拔 1500 m 以上的中高山地区,环境温度较低、湿度较大,植被覆盖率高。因此,该区棕壤和黄棕壤土壤有机碳密度较高。紫色土黏土矿物以伊利石、蒙脱石、绿泥石为主,2:1 型矿物也占主要地位。但是,紫色土质地为砂质黏壤土,砂粒含量高;土壤结构很不稳定,水稳性很差,遇水散碎,极易形成地表径流和冲沟,造成有机碳流失。同时,紫色土大多分布于海拔 800 m 以内,人口密度大、垦殖率高,不利于有机碳的保存(倪九派等, 2009),因此,紫色土有机碳密度最低。

4.2 人为活动对土壤有机碳密度影响分析

土地利用方式是人类活动影响土壤有机碳的重要途径,人类对土地の利用、改造和保护不同,对土壤有机碳的影响随之不同。土地利用方式不仅可以直接决定地表植被类型影响土壤有机碳的输入,还会引起土壤理化性质的差异,从而影响土壤有机碳密度(史永亮和蒋桂欣, 2022)。研究区林地土壤有机碳密度最高,草地次之,一方面是由于大量枝叶凋落物及草本植物根系使得土壤有机碳输入较多,另一方面林、草地多分布于高海拔区,有机碳分解较缓,有利于有机碳的贮存。就耕地中水田、旱地而言,水田常年处于淹水状态不利于有机碳的分解,土壤有机碳密度相对较高。建设用地植被较少有机碳输入不足,人类活动剧烈土壤有机碳分解作用较强,导致有机碳密度较低。

4.3 土壤有机碳对碳减排的贡献

农田土壤固碳优势明显,它不仅能够实现大气 CO₂ 减排,还可以改善退化的土壤,提高生物产量。农田土壤固碳在中国温室气体减排中占有重要地位,1990—2015 年农田土壤碳汇相当于中国 2006 年总 CO₂ 排放量的约 40%(杨柯, 2016);1982—2004 年,江苏省表土有机碳库增加了 24 Tg C,相当于该省 1994 年 CO₂ 总排放量的 20%(Liao et al., 2009)。

在保持采样期间耕作方式、农田管理措施和自

然气候等不变的情况下,重庆市研究区内农田土壤整体上表现为“碳汇”,固碳潜力为 36.88 Tg C,即土壤要吸收碳才能达到一种动态平衡状态,相当于该市 2018 年能源消耗碳排放量的 24.10%(唐志欣等, 2022)。但是部分区县,如北碚、铜梁、潼南、大足,有机碳密度增长潜力较小,不合理的耕作活动可能导致这些区域能为“碳源”,向空气中释放碳。农田耕作制度、施肥方式、作物残渣的管理方式等是影响土壤有机碳存储及转化的重要人为活动,浅耕或免耕、化肥配施有机肥、秸秆还田是提高土壤有机碳含量的有效措施(常小峰等, 2013; 林赤辉等, 2020; 乐小芳等, 2020),建议加强农田管理,采取适宜当地有效措施,提高土壤固碳潜力,充分发挥碳减排作用。

5 结 论

(1)研究区 0~20 cm 表层土壤有机碳密度范围为 0.07~23.3 kg/m²,平均密度为 2.75 kg/m²。

(2)表层土壤有机碳密度分布具有中等程度空间自相关性,空间变异受自然和人为因素共同影响。空间分布上,表层土壤有机碳密度大体呈现东南部、东北部较高,中西部较低的格局。

(3)表层土壤有机碳密度与海拔、坡度、降雨量极显著正相关,与温度、pH 值极显著负相关。从土壤类型看,棕壤、黄棕壤有机碳密度较高,紫色土有机碳密度最低;从土地利用方式看,林地、草地土壤有机碳密度较高,旱地、建设用地等较低。海拔、温度、土壤类型是较重要影响因素,其次是降雨量、土地利用方式,土壤 pH 值和坡度重要性较低。

(5)在达到碳平衡之前,研究区农田土壤总体上发挥碳汇效应,固碳潜力为 36.88 Tg C,其中江津、合川、梁平、涪陵固碳潜力较大。

References

- Ajami M, Heidari A, Khormali F, Gorji M, Ayoubi S. 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumidregion, northern Iran[J]. *Geoderma: An International Journal of Soil Science*, 281: 1–10.
- Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Konopka A E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5): 1501–1511.
- Chang Xiaofeng, Wang Shiping, Xu Guangping, Bai Ling. 2013. Estimating uncertainties and determinants of soil organic carbon stock[J]. *Guihaia*, 33(5): 710–716, 668 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jin, Huang Wenqing, Zhang Shichang, Zhang Weiqing, Huang Gongbiao, Zhang Jiangzhou, Wu Liangquan. 2023. Spatial distribution of and factors influencing topsoil organic carbon density in Fujian Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 40(4): 805–816 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jingjing. 2015. Changes of Soil Carbon Pool in Typical Areas of Changjiang Drainage Basin and Carbon Sequestration Potential[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–78 (in Chinese with English abstract).
- Huang Changyong. 2000. *Soil Science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 26–28 (in Chinese).
- Huang Qiaoyun, Lin Qimei, Xu Jianming. 2015. *Soil Biochemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 155–157 (in Chinese).
- Huang Xuexia, Ni Jiupai, Gao Ming, Wei Chaofu, Xie Deti. 2005. Estimating soil organic carbon pool of Chongqing area and its spatial distribution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19(1): 54–58 (in Chinese with English abstract).
- Kong Xiangbin, Hu Yingjie, Li Yue, Duan Zengqiang. 2019. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing[J]. *Resources Science*, 41(12): 2307–2315 (in Chinese with English abstract).
- Le Xiaofang, Chen Jiachun, Miao Lu. 2020. A review of agricultural soil carbon sink research[J]. *Agriculture and Technology*, 40(22): 8–10 (in Chinese).
- Li Haiyan, Zhou Huijie, Mo Liping. 2024. Distribution characteristics and influencing factors of organic carbon in farmland soil in Rongxian County[J]. *Agriculture and Technology*, 44(5): 92–97 (in Chinese).
- Liao Q L, Zhang X H, Li Z P, Pan G X, Wu X M. 2009. Increase in soil organic carbon stock over the last two decades in China's Jiangsu Province[J]. *Global Change Biology*, 15(4): 861–875.
- Lin Chihui, Guo Xiaoyu, Kang Wenhui, Zhang Yu. 2020. Effects of different management measures on soil carbon cycle[J]. *West Resources*, 95(2): 165–168 (in Chinese with English abstract).
- Liu Aili, Wang Peifa, Ding Yuan. 2012. *Introduction to Geostatistics*[M]. Beijing: Science Press, 60–67 (in Chinese).
- Liu Guodong, Li Ying, Zhang Li, Cui Yujun, Yang Ke, Liu Yinghan. 2014. The estimation of soil carbon sequestration potential in southern Songnen plain[J]. *Geology in China*, 41(2): 658–664(in Chinese with English abstract).
- Liu Qingyu, Ma Ying, Cheng Li, Shen Xiao, Zhang Yafeng, Miao Guowen, Huang Qiang, Han Siqi. 2023. Density and spatial distribution of organic carbon in the topsoil of eastern Qinhai[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 47(4): 1098–1108 (in Chinese with English abstract).
- Lü Yuanchun, Xu Pengcheng. 2012. Response of soil organic carbon to temperature changes under different land use patterns[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(35): 17079–17080, 17097 (in

- Chinese with English abstract).
- Ni Jiupai, Yuan Daoxian, Xie Deti, Wei Chaofu. 2009. Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distributions in karst area, Chongqing, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(11): 6292–6301 (in Chinese with English abstract).
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A J. 1982. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 298(5870): 156–159.
- Qin Zhangcai, Huang Yao. 2010. Model-based estimation of soil carbon sequestration potential in farmland[J]. *Chinese Science: Life Sciences*, 40(7): 658–676 (in Chinese).
- Sichuan Provincial Department of Agriculture and Animal Husbandry, Sichuan Provincial Soil Census Office. 1997. *Sichuan Soil*[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 191–213, 316–370, 392–453(in Chinese).
- Shi Yongliang, Jiang Guixin. 2022. Effects of different agricultural land use patterns on distribution of soil organic carbon and total nitrogen[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 34(12): 101–106 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xijun, Deng Rui, Lü Shuang, Gao Ying, Cai Miao, Gou Qiaohong, Zhao Juan. 2022. Spatial variability characteristics of farmland soil organic matter in Xi'an[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(35): 43–53 (in Chinese with English abstract).
- Tang Min. 2019. Research advances in spatial and temporal distribution of soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. *Journal of Henan University of Engineering*, 31(4): 42–49,82 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhixin, Xiao Peng, Zhang Dan, Xie Geng, Zhang Yunhuai. 2022. Dynamic characteristics and driving factors decomposition of energy consumption carbon emissions in Chongqing[J]. *Environmental Impact Assessment*, 44(3): 84–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang D, He N P, Wang Q, Li Y L, Wang Q F, Xu Z W, Zhu J X. 2016. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Pedosphere*, 26(3): 399–407.
- Wang Dandan, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Wang Hongjie, Sun Weixia, Ren Hongyan. 2009. Main natural factors controlling soil organic carbon density in the uplands of Northeast China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(3): 1049–1053 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haocheng, Yang Bingjuan, Liang Xiaogui, Hu Qiliang, Li Na, Huang Guoqin. 2024. A review of researches on cropland soil organic carbon pool and its influencing factors in China[J]. *Ecological Science*, 43(2): 260–270 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiuli, Zhang Fengrong, Zhu Taifeng, Zhou Jian, Wu Hao, Yang Lifang. 2013. Study on the distribution and influencing factors of soil organic carbon in mountainous areas of Beijing[J]. *Resources Science*, 35(6): 1152–1158 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjun. 2012. The characteristics of soil organic carbon reserves in Longyan area, Fujian Province, and their impacting factors[J]. *Quaternary Sciences*, 32(2): 337–345 (in Chinese with English abstract).
- Wen Xin, Wang Yihui, Zhong Cong, Hu Baoqing, Zhang Xinying. 2023. Spatial variation of surface soil organic matter and its influencing factors in Guizhou Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 37(3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wu Hao. 2015. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for pine–oak mixed forest in Qinling Mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 30(5): 858–869 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xiaohuan, Yang Zhongfang, Liao Qilin, Zhang Jianxin, Bai Rongjie, Zhang Xiuzhi, Jin Lixin, Wang Hui Feng, Li Min, Xia Xueqi. 2010. Soil organic carbon storage in typical regions of China[J]. *Quaternary Sciences*, 30(3): 573–583 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xiaohuan, Yang Zhongfang, Xia Xueqi, Li Min. 2009. Calculation techniques for soil carbon storage of China based on multi-purpose geochemical survey[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 194–205 (in Chinese with English abstract).
- Yan Ningzhen, Cheng Yongyi, Yang Jianghong, Qu Ming. 2013. Distribution and impact factor of soil organic carbon on topsoil in karst mountain: A case study of Beibei district of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 32(3): 292–298 (in Chinese with English abstract).
- Yang Anguang, Miao Zhenghong, Qiu Fafu, Yang Qingchen, Wang Zongming, Mao Dehua. 2015. A study on storage and distribution of soil organic carbon in Sanjiang Plain based on GIS[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 35(2): 155–158 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ke. 2016. *Soil Carbon Sequestration Potential of Typical Agricultural Area in China*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–167 (in Chinese with English abstract).
- Yang Weidong, Zeng Lianbo, Li Xiang. 2023. Advances in research of carbon sinks and their influencing factors evaluation[J]. *Advances in Earth Science*, 38(2): 151–167 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yixun, Jiang Xiaoxu, Li Mingsheng, Yang Nan, Feng Xue. 2022. Spatial variability of soil organic carbon content and density in the Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 53(6): 1313–1319 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhongfang, Xia Xueqi, Yu Tao, Hou Qingye, Feng Haiyang. 2011. Soil carbon pool in the northeast Inner Mongolia and its influencing factors[J]. *Earth and Science Frontiers*, 18(6): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuyi. 2020. *Environmental Analysis of Rose Orange Production Area—Taking Ganning Town in Wanzhou District as An Example*[D]. Chongqing: Southwest University, 1–81 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jinlin, Huang Yang, Chen Jiaping, Wang Longchang. 2015. Analysis on temporal and spatial variations of organic carbon and carbon sequestration potential in farmland soil in Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(11): 3647–3654 (in Chinese with English abstract).

- Zhou Meng, Liang Zhipeng, Zou Tianxiang, Tu Junxi, Hu Yanfeng, Shen Wenjie. 2024. Estimation of organic carbon storage and carbon sequestration potential of cultivated soil in red beds area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 63(3): 12–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Shuang. 2016. Analysis of Influencing Factors and Prediction of Soil Organic Carbon at Agricultural Landscape in Hilly Area[D]. Chongqing: Southwest University, 1–57 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 常小峰, 汪诗平, 徐广平, 白玲. 2013. 土壤有机碳库的关键影响因素及其不确定性[J]. *广西植物*, 33(5): 710–716, 668.
- 程金, 黄文卿, 张世昌, 张卫清, 黄功标, 张江周, 吴良泉. 2023. 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*, 40(4): 805–816.
- 郭晶晶. 2015. 长江流域典型地区土壤碳库变化及固碳潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–78.
- 黄昌勇. 2000. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 26–28.
- 黄巧云, 林启美, 徐建明. 2015. 土壤生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 155–157.
- 黄雪夏, 倪九派, 高明, 魏朝富, 谢德体. 2005. 重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 19(1): 54–58.
- 孔祥斌, 胡莹洁, 李月, 段增强. 2019. 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*, 41(12): 2307–2315.
- 乐小芳, 陈佳淳, 苗璐. 2020. 农业土壤碳汇研究综述[J]. *农业与技术*, 40(22): 8–10.
- 李海燕, 周慧杰, 莫莉萍. 2024. 容县耕地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *农业与技术*, 44(5): 92–97.
- 林赤辉, 郭小雨, 康文慧, 张宇. 2020. 耕地不同管理措施对土壤碳循环的影响研究[J]. *西部资源*, 95(2): 165–168.
- 刘爱利, 王培法, 丁园. 2012. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 60–67.
- 刘国栋, 李瑛, 张立, 崔玉军, 杨柯, 刘应汉. 2014. 松嫩平原耕层土壤固碳潜力估算[J]. *中国地质*, 41(2): 658–664.
- 刘庆宇, 马瑛, 程莉, 沈骁, 张亚峰, 苗国文, 黄强, 韩思琪. 2023. 青海东部表层土壤有机碳密度及其空间分布特征[J]. *物探与化探*, 47(4): 1098–1108.
- 吕元春, 许鹏程. 2012. 不同土地利用方式下的土壤有机碳对温度变化的响应[J]. *安徽农业科学*, 40(35): 17079–17080, 17097.
- 倪九派, 袁道先, 谢德体, 魏朝富. 2009. 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. *生态学报*, 29(11): 6292–6301.
- 覃章才, 黄耀. 2010. 基于模型的农田土壤固碳潜力估算[J]. *中国科学: 生命科学*, 40(7): 658–676.
- 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 1997. 四川土壤[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 191–213, 316–370, 392–453.
- 史永亮, 蒋桂欣. 2022. 不同农业土地利用方式对土壤有机碳和全氮的分布影响[J]. *江西农业学报*, 34(12): 101–106.
- 孙喜军, 邓睿, 吕爽, 高莹, 蔡苗, 蔡巧红, 赵娟. 2022. 西安市农用地土壤有机质空间变异特征[J]. *中国农学通报*, 38(35): 43–53.
- 唐敏. 2019. 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)*, 31(4): 42–49, 82.
- 唐志欣, 肖鹏, 张丹, 谢耕, 张云怀. 2022. 重庆市能源消费碳排放动态特征及驱动因素分解[J]. *环境影响评价*, 44(3): 84–88.
- 王丹丹, 史学正, 于东升, 王洪杰, 孙维侠, 任红艳, 赵永存. 2009. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J]. *生态环境学报*, 18(3): 1049–1053.
- 王浩成, 杨滨娟, 梁效贵, 胡启良, 李娜, 黄国勤. 2024. 中国农田土壤有机碳库及其影响因素研究述评[J]. *生态科学*, 43(2): 260–270.
- 王秀丽, 张凤荣, 朱泰峰, 周建, 吴昊, 杨黎芳. 2013. 北京山区土壤有机碳分布及其影响因素研究[J]. *资源科学*, 35(6): 1152–1158.
- 王文俊. 2012. 福建龙岩地区土壤有机碳储量特征及其影响因素[J]. *第四纪研究*, 32(2): 337–345.
- 文鑫, 王艺惠, 钟聪, 胡宝清, 张新英. 2023. 贵州表层土壤有机质空间变异特征及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 37(3): 1–7.
- 吴昊. 2015. 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*, 30(5): 858–869.
- 奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 张建新, 白荣杰, 张秀芝, 金立新, 王会峰, 李敏, 夏学齐. 2010. 中国典型地区土壤碳储量研究[J]. *第四纪研究*, 30(3): 573–583.
- 奚小环, 杨忠芳, 夏学齐, 李敏. 2009. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究[J]. *地学前缘*, 16(1): 194–205.
- 严宁珍, 程永毅, 杨剑虹, 屈明. 2013. 岩溶山地土壤有机碳的分布特征及表层土壤有机碳的影响因素分析——以重庆市北碚区为例[J]. *中国岩溶*, 32(3): 292–298.
- 杨安广, 苗正红, 邱发富, 杨清臣, 王宗明, 毛德华. 2015. 基于GIS的三江平原表层土壤有机碳储量估算及空间分布研究[J]. *水土保持通报*, 35(2): 155–158.
- 杨柯. 2016. 我国典型农耕地土壤固碳潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学, 1–167.
- 杨卫东, 曾联波, 李想. 2023. 碳汇效应及其影响因素研究进展[J]. *地球科学进展*, 38(2): 151–167.
- 杨亦恂, 姜晓旭, 李名升, 杨楠, 封雪. 2022. 三江平原土壤有机碳含量及其密度的空间变异特征分析[J]. *土壤通报*, 53(6): 1313–1319.
- 杨忠芳, 夏学齐, 余涛, 侯青叶, 冯海艳. 2011. 内蒙古中北部土壤碳库构成及其影响因素[J]. *地学前缘*, 18(6): 1–10.
- 张云逸. 2020. 玫瑰香橙产地环境分析—以万州区甘宁镇为例[D]. 重庆: 西南大学, 1–81.
- 周金霖, 黄阳, 陈佳婧, 王龙昌. 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.
- 周萌, 梁志鹏, 邹天祥, 涂俊喜, 胡炎凤, 沈文杰. 2024. 红层区耕地土壤有机碳储量估算与固碳潜力分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 63(3): 12–20.
- 周双. 2016. 丘陵山区农田土壤有机碳密度影响因素与制图研究[D]. 重庆: 西南大学, 1–57.