

DOI: 10.11766/trxb202409220371

CSTR: 32215.14.trxb202409220371

龙军, 张黎明, 黄倩, 张秀, 卞阿娜, 朱丽霞, 陈清森, 邢世和. 1982—2018 年福建省耕地土壤有机碳库变化的区域差异研究[J]. 土壤学报, 2025, 62 (5): 1294–1307.

LONG Jun, ZHANG Liming, HUANG Qian, ZHANG Xiu, BIAN Ana, ZHU Lixia, CHEN Qingsen, XING Shihe. Regional Differences of Farmland Soil Organic Carbon Pool Changes in Fujian Province from 1982 to 2018[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (5): 1294–1307.

1982—2018 年福建省耕地土壤有机碳库变化的区域差异研究*

龙 军^{1,2}, 张黎明², 黄 倩², 张 秀², 卞阿娜¹, 朱丽霞¹, 陈清森¹, 邢世和^{2†}

(1. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363005; 2. 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002)

摘 要: 准确揭示耕地土壤有机碳时空变化可为粮食安全和“双碳”目标的实现提供科学依据。以 30 多万图斑和 5 万多样点建立的 1:1 万数据库为基础, 利用优化的地统计学插值方法和重心迁移模型定量化分析 1982—2018 年福建省不同区域耕地表层土壤有机碳库的时空变化。结果表明, 福建省耕地土壤有机碳库变化的区域差异较大。1982 年和 2018 年闽东南沿海市域耕地土壤有机碳密度分别介于 2.37~2.65 kg·m⁻² 和 2.23~2.83 kg·m⁻², 远小于闽西北内陆市域, 且莆田以外的其他市域耕地土壤总体表现为固碳增汇。水稻土和水田是全省最主要的碳汇土壤类型和土地利用类型, 有机碳储量提升 0.10 kg·m⁻², 滨海盐土、风砂土和旱地土壤有机碳密度分别下降 0.23 kg·m⁻²、0.22 kg·m⁻² 和 0.03 kg·m⁻²。福建中亚热带耕地土壤有机碳密度由 3.02 kg·m⁻² 上升为 3.16 kg·m⁻², 贮碳水平和碳汇强度均高于福建南亚热带。不同区域耕地土壤有机碳库重心的变异方向、角度和距离也有所差异。未来应根据不同区域土壤有机碳水平及其变化差异针对性制定耕地土壤固碳减排措施。

关键词: 耕地土壤有机碳; 碳源/汇; 重心迁移模型; 区域差异; 福建省

中图分类号: S15 文献标志码: A

Regional Differences of Farmland Soil Organic Carbon Pool Changes in Fujian Province from 1982 to 2018

LONG Jun^{1,2}, ZHANG Liming², HUANG Qian², ZHANG Xiu², BIAN Ana¹, ZHU Lixia¹, CHEN Qingsen¹, XING Shihe^{2†}

(1. School of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363005, China; 2. University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] Estimating the spatial-temporal changes of farmland soil organic carbon density (SOCD) provides a scientific basis for food security and double-carbon strategy. [Method] In this study, a total of 371 976 polygonal patches and 57 254 sampling sites were used to establish 1:10, 000 databases. The raster dataset of soil organic matter content was

* 国家社会科学基金 (23XTJ005) 资助 Supported by the National Social Science Fund of China (No. 23XTJ005)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fafuxsh@126.com

作者简介: 龙 军 (1987—), 男, 江西芦溪人, 博士, 副教授, 主要从事土壤碳氮循环与数字制图研究。E-mail: longjun608@163.com

收稿日期: 2024-09-22; 收到修改稿日期: 2024-11-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-09

interpolated using the simple kriging method combining with ancillary variables of terrain information, which was an optimal interpolation established in the earlier study based on the idea of “ideal interpolation method + efficient auxiliary variables”. Then, the SOM content was assigned to each polygonal patch of the farmland map with the help of the spatial analyst tools of ArcGIS v. 10.8 software. Eventually, the SOCD was calculated. Moreover, the gravity center migration model was employed to quantify the regional differences in farmland SOCD changes in Fujian Province from 1982 to 2018. The regions mentioned above referred to different administrative regions of nine cities, soil types of nine soil groups, three land use types of paddy fields, dry-land, and irrigated land, and two climatic zones such as the middle subtropics and south subtropics of Fujian. Also, these nine cities were divided into the southeastern coastal cities and northwest inland cities of Fujian. 【 Result 】 The farmland soils in different regions had dual functions of carbon source and sink in the past 40 years. Viewed from the area ratio of farmland soil carbon source and sink, the carbon sequestration capacity or loss intensity of most farmland was concentrated in the range of 0~1 kg·m⁻², regardless of administrative regions, soil types, land use types, or climatic zones. Specifically, the farmland SOCDs in the southeastern coastal cities of Fujian were 2.37–2.65 kg·m⁻² and 2.23–2.83 kg·m⁻² in 1982 and 2018, respectively, which were much lower than those of northwest inland cities(2.92–3.24 kg·m⁻² and 2.99–3.30 kg·m⁻²). It was also found that Putian was the only city to experience a decline in SOCD, with a carbon source effect of 0.31 kg·m⁻². In terms of soil types and land use patterns, paddy soils and paddy fields were the most important carbon sink, with SOCD increased by 0.10 kg·m⁻², while coastal solonchaks, aeolian soils, and dry-land contributed as a carbon source, with SOCD decreased by 0.23 kg·m⁻², 0.22 kg·m⁻² and 0.03 kg·m⁻², respectively. When it came to climatic zones, the farmland soil in the middle subtropics of Fujian increased from 3.02 kg·m⁻² (1982) to 3.16 kg·m⁻² (2018) in SOCD, with higher SOCD level and carbon sequestration efficiency than those of south subtropics. 【 Conclusion 】 The farmland soil organic carbon pool changes varied greatly with regions in Fujian Province from 1982 to 2018. These changes might have been mainly influenced by a combination of intrinsic soil factors and external factors such as human disturbance. Thus, our work suggests that in formulating policies for farmland carbon sequestration management in Fujian in the years to come, priority should be given to the SOCD level in different regions and their change differences.

Key words: Farmland soil organic carbon; Carbon source or sink; Gravity center migration model; Regional differences; Fujian Province

“农稳社稷，粮安天下”，粮食安全是国之大事，以习近平总书记为核心的党中央始终将粮食安全作为治国理政的头等大事。土壤有机质（碳）作为评价土壤肥力及耕地质量的关键指标，对提升粮食供给、保障粮食安全至关重要^[1]。当前我国正在积极推进碳达峰碳中和，“双碳”战略两大纲领性文件均提出要开展土壤碳汇本底调查、碳储量评估和潜力分析，提升土壤有机碳储量。全球土壤有机碳储量约 1 500 Pg，是大气碳库的 2 倍，其较大幅度变化可对大气二氧化碳（CO₂）浓度产生重大影响^[2-3]。耕地是受农业管理措施等人为影响最强烈、唯一可在较短时间内调节的土壤碳库，对大气 CO₂ 具有“源”与“汇”双重作用，耕地固碳是减缓大气 CO₂ 浓度升高最经济可行和环境友好的途径之一^[4-5]。因此，准确揭示耕地土壤有机碳时空变化对实现粮食安全和“双碳”目标具有重要意义。

土壤有机碳时空变化与作用机理研究是农业、生态和环境等多学科领域的热点^[6]。特别是 20 世纪 50 年代以来，大量野外调查和 3S 技术快速发展使数据资料呈多源、多尺度和多维度^[7]。目前国家尺度耕地碳库研究以 1 : 1 000 万、1 : 400 万和 1 : 100 万等小比例尺土壤图和《中国土种志》为主，全国耕地土壤固碳速率约 74~184 kg·hm⁻²·a^[4, 7-9]。省域尺度常采用 1 : 100 万、1 : 50 万和 1 : 20 万等中小比例尺数据库和省级土种志资料，东北三省外的其他省份总体为碳汇^[10-12]。土壤有机碳时空变化的内在机理主要涉及气候^[13]、地形^[14]、母质^[15]、生物^[16]、土地利用方式^[17]和农业管理措施^[18]等因素，但不同制图尺度下揭示的影响因子作用有所差异^[19]。大区域常以降水量、气温等气候条件为主控因子^[20]，小区域则受土壤特性和管理措施影响更大，如西班牙南部土壤有机碳与土层厚度、黏粒含量正相关最

强,但气象因子对该区域土壤有机碳变化的影响很小^[21]。我国耕地初始有机碳含量较低,且近些年秸秆还田力度增大,耕地土壤固碳作用较为明显^[4, 22]。但土壤有机碳时空变化特征具有尺度效应,目前以中、小比例尺数据库为主的区域土壤碳库研究因图斑概化而忽略很多局部变异造成研究结果具有较大不确定性,亟需基于较大比例尺数据库开展碳库变化研究^[23]。

“碳达峰、碳中和”已纳入生态文明建设整体布局,福建省作为党的十八大以来国务院确定的第一个生态文明先行示范区,全省人均耕地面积仅为 0.02 hm^2 ,远低于全国平均水平 0.09 hm^2 ,且全省中低产耕地面积比例较高,导致粮食自给率仅为23%,粮食安全保障任务十分艰巨。因此,准确揭示福建省不同区域耕地土壤有机碳时空变化对全省推进“碳中和”工作、落实“藏粮于地、藏粮于技”战略具有重要意义。本研究利用5万多样点和30多万图斑建立详细的1:1万比例尺耕地土壤数据库,基于优化的地统计学模型和重心迁移模型开展1982—2018年福建省耕地土壤有机碳库变化的区域差异研究,时间维度上定量化碳源/汇大小,空间维度上明确碳库演变方向、角度和距离,研究结果可为碳汇本底定量调查与数字土壤精准制图、准确制定固碳减排分区级对策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海,位于 $23^{\circ}33'—28^{\circ}20'N$ 、 $115^{\circ}50'—120^{\circ}40'E$,现辖福州、莆田、泉州、厦门、漳州、龙岩、三明、南平、宁德9个设区市和平潭综合实验区(图1a)。福建省属亚热带海洋季风气候,水热条件丰富,年降水量 1500 mm ,年均气温 $19.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,其中,闽东南属亚热带,闽北、闽东和闽西北为中亚热带^[24]。福建省第三次国土调查耕地面积为 $9.32 \times 10^5 \text{ hm}^2$,水稻土和水田分别占耕地总面积的80%以上^[25]。

1.2 数据来源

(1)数字化福建省各县(市、区)第二次土壤普查纸质土壤图建立1982年耕地土壤数据库(图1b),包括水稻土、赤红壤、红壤等9个土类,共

209 011个图斑;(2)从福建省1:1万比例尺土地利用现状图提取耕地图斑建立2018年耕地数据库(图1c),包括水田、旱地和水浇地等利用类型,共2 439 458个图斑;(3)收集福建省各县(市、区)第二次土壤普查调查样点的采样深度和定位信息(如样点所在社区一大队或村名称、土壤类型(具体到土种)、地形部位等)、2018年耕地质量监测样点经纬度坐标以及两期土壤属性检测数据等,利用ArcGIS v. 10.8建立1982年(图1d, 36 777个样点)和2018年样点数据库(图1e, 20 477个样点),其中,有机质含量采用油浴加热—重铬酸钾氧化容量法测定,质地采用吸管法测定;(4)福建省行政区划图和数字高程模型(图1a);(5)收集气象站点资料,基于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温等指标区划福建中亚热带和南亚热带(图1f)^[26];(6)收集整理1982—2018年福建省统计数据,如各县(市、区)粮食播种面积及氮肥(折纯)施用量等。本研究对两期耕地图斑进行空间叠加,以交集作为1982—2018年耕地土壤有机碳时空变化的评价底图,评价单元为具有土壤类型(具体到土种)和利用类型(水田、旱地和水浇地)等信息的371 976个耕地图斑。上述空间数据采用2000国家大地坐标系、高斯-克吕格(3度分带)投影、克拉索夫斯基椭球参数、1985年国家高程基准等标准。

1.3 空间插值

空间插值可将离散样点转换为覆盖全区域的连续曲面,是实现采样数据由点到面拓展的重要手段。本研究采用的插值方法是前期基于“理想插值方法+高效辅助变量”思路建立的插值精度更高的优化模型“结合地形辅助变量信息的简单克里格插值法”,该模型利用的地形信息主要是海拔和坡度2个因子^[25]。插值过程是基于ArcGIS v. 10.8的“Geostatistical Wizard”功能生成覆盖福建省所有耕地图斑的有机质含量地统计图层,然后利用“GA Layer To Grid”工具将其导出为 0.05 km 分辨率的栅格数据集(像元大小与评价底图最小图斑面积 0.25 hm^2 基本一致),借助“Zonal Statistics as Table”工具汇总每个耕地图斑区域内的栅格数据值(包括计数项、最小值、最大值、平均值、标准差等),再通过唯一标识的区域字段完成耕地图斑的平均有机质含量赋值。

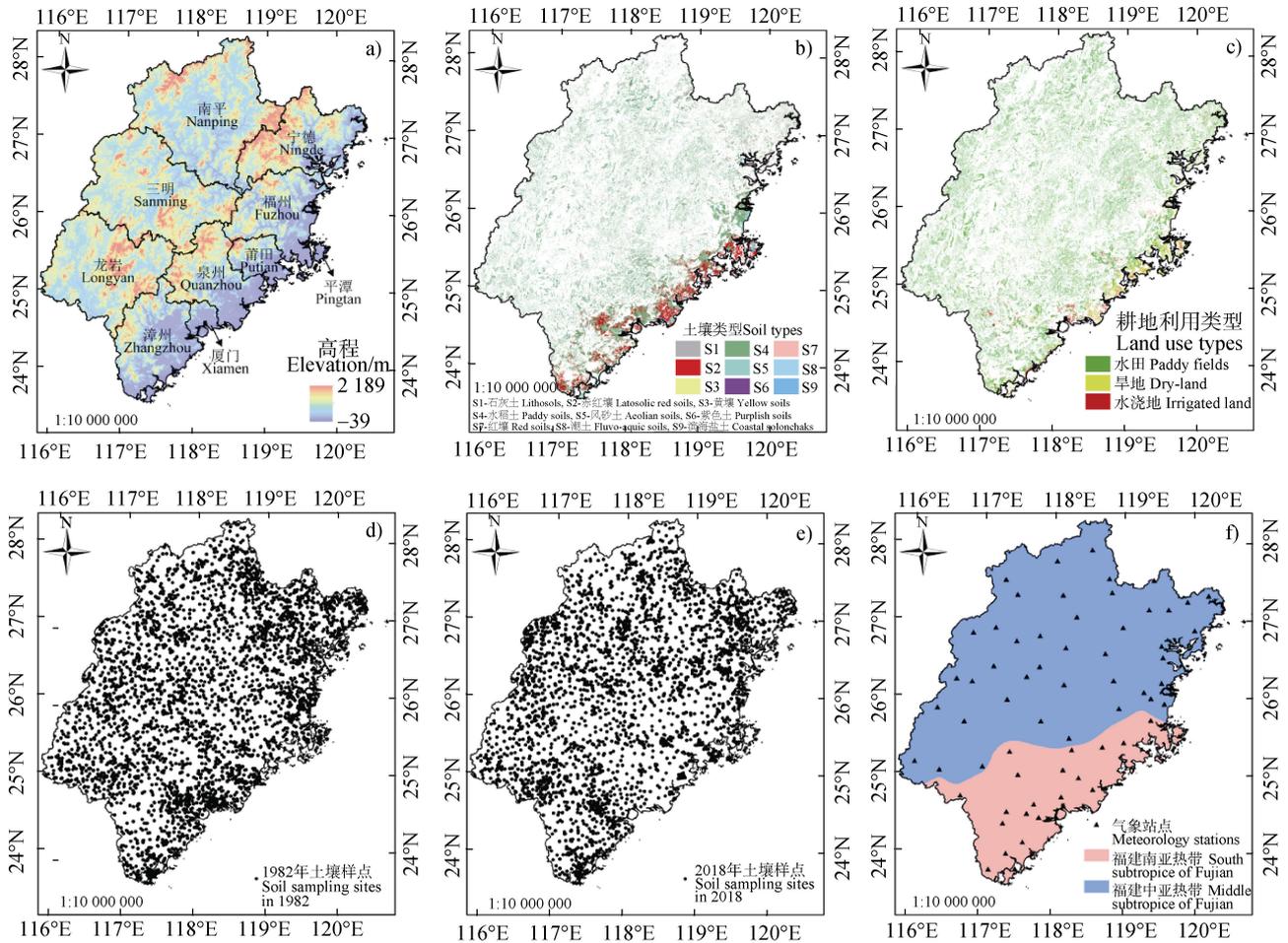


图 1 研究区主要数据源

Fig. 1 Main data sources in the study area

1.4 土壤有机碳密度计算

基于图斑计算土壤有机碳密度 (Soil Organic Carbon Density, SOCD, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) [27]:

$$\text{SOCD} = \frac{(1 - \delta\%) \times \rho \times C \times T}{100} \quad (1)$$

式中, $\delta\%$ 为土壤中 $>2 \text{ mm}$ 砾石的体积百分含量, ρ 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), C 为土壤有机碳含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 等于 0.58 乘以有机质含量, T 为耕层厚度 15 cm。

1.5 土壤碳源/汇大小测算

基于图斑开展 1982—2018 年研究区耕地土壤碳源/汇大小 ($\Delta\text{SOCD}_{1982-2018}$) 测算:

$$\Delta\text{SOCD}_{1982-2018} = \text{SOCD}_{2018} - \text{SOCD}_{1982} \quad (2)$$

式中, SOCD_{1982} 和 SOCD_{2018} 分别为 1982 年和 2018 年土壤有机碳密度。若 $\Delta\text{SOCD}_{1982-2018} > 0$, 耕地土

壤为碳汇, 否则为碳源。

1.6 土壤有机碳密度重心变化分析

重心迁移模型可定量分析不同时期目标变量重心偏离几何中心的距离和方向, 直观展现其在二维空间上的发展运动轨迹 [28]。本研究利用 ArcGIS v. 10.8 的“Geometry Calculations”计算耕地图斑的几何中心经纬度坐标, 以图斑面积与有机碳密度的乘积为权重, 基于重心迁移模型测算 1982—2018 年耕地土壤有机碳密度重心的变化方向, 明确迁移角度和距离, 量化揭示土壤有机碳库时空分布特征与演变规律有利于耕地固碳减排分区分级对策的准确制定。

区域内第 i 个图斑的几何中心经纬度坐标表示为 (X_i, Y_i) , 该区域耕地土壤有机碳密度重心的总体经纬度坐标 (X^*, Y^*) 计算如下 [29]:

$$X^* = \frac{\sum_{i=1}^n S_i C_i X_i}{\sum_{i=1}^n S_i C_i} \quad (3)$$

$$Y^* = \frac{\sum_{i=1}^n S_i C_i Y_i}{\sum_{i=1}^n S_i C_i} \quad (4)$$

式中, S_i 为第 i 个图斑的面积 (m^2), C_i 为第 i 个图斑的土壤有机碳密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), n 为图斑总数。

1982 年和 2018 年耕地土壤有机碳密度重心的经纬度坐标分别表示为 (x_{1982}^* , y_{1982}^*) 和 (x_{2018}^* , y_{2018}^*), 2018 年相对于 1982 年偏移的角度 θ ($^\circ$) 和距离 D (km) 计算如下^[30-31]:

$$\theta = \theta_{2018} - \theta_{1982} = \left[\frac{k \times \pi}{2} + \arctan \left(\frac{y_{2018}^* - y_{1982}^*}{x_{2018}^* - x_{1982}^*} \right) \right] \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5)$$

$$D = B \times \sqrt{(x_{2018}^* - x_{1982}^*)^2 + (y_{2018}^* - y_{1982}^*)^2} \quad (6)$$

式中, $k = 0, 1, 2$, $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$, 指定正东方向为 0° , 逆时针方向为正方向, 第一象限 ($0^\circ, 90^\circ$) 为东北方向; 第二象限 ($90^\circ, 180^\circ$) 为西北方向; 第三象限 ($-180^\circ, -90^\circ$) 为西南方向; 第四象限 ($-90^\circ, 0^\circ$) 为东南方向; B 为经纬度坐标 ($^\circ$) 转换为平面距离 (km) 的系数 111.111。

1.7 数据统计与制图

本研究的区域差异主要基于行政区 (9 个设区市及其所处区位-福建东南沿海市域和西北内陆市域)、土壤类型 (9 个土类)、利用类型 (水田、旱地、水浇地)、气候带 (福建南亚热带和中亚热带) 等角度进行数据统计与制图, 其中, 平潭综合实验区归并到福州市统计、制图, 南平、三明、宁德和龙岩 4 市按福建西北内陆市域统计, 福州、莆田、泉州、厦门和漳州 5 市按福建东南沿海市域统计。数据库建设及其空间统计与分析、像片图制作均采用 ArcGIS v. 10.8 软件, 数据描述性统计及其柱状图、拆线图绘制采用 Microsoft Excel 2010。

2 结果

2.1 1982 年和 2018 年耕地碳库时空分布特征

2018 年福建省不同行政区域、土壤类型、利用类型和气候带的耕地土壤有机碳密度空间变异程度均明显强于 1982 年 (表 1)。2018 年有机碳密度最小值出现在莆田市-赤红壤-水浇地-福建南亚热带

区域, 仅为 $0.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 最大值为宁德市-红壤-水田-福建中亚热带区域的 $6.37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 二者相差约 15 倍; 而 1982 年最小值 (漳州市-风砂土-水浇地-福建南亚热带, $1.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和最大值 (龙岩市-水稻土-水田-福建中亚热带, $3.89 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 仅相差 1 倍多。2018 年不同区域耕地土壤有机碳密度变异系数介于 $7.71\% \sim 26.55\%$, 整体大于 1982 年 ($7.08\% \sim 17.11\%$), 且以福州市、滨海盐土、水浇地和福建南亚热带的耕地有机碳密度变异相对较大, 而厦门市、红壤、水田和福建中亚热带区域变异相对较小。

从平均密度来看, 1982 年和 2018 年闽西北内陆市域龙岩、南平、三明和宁德的有机碳密度均高于闽东南沿海市域福州、莆田、泉州、厦门和漳州, 全省耕地有机碳密度总体呈闽东南沿海向闽西北内陆上升的趋势 (图 2)。土壤类型以石灰土、水稻土、黄壤、红壤和紫色土有机碳密度均高于 $2.80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 而滨海盐土、风砂土和赤红壤有机碳密度均低于 $2.30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 特别是 2018 年风砂土和滨海盐土的有机碳密度低至 $1.86 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1.96 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 仅为全省平均水平的 64.72% 和 68.17% 。不同利用类型土壤有机碳密度最高的是水田, 1982 年和 2018 年分别达 $2.89 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2.99 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其次是水浇地, 旱地有机碳密度最小, 分别为 $2.35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2.31 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。1982 年和 2018 年福建中亚热带耕地土壤有机碳密度分别达 $3.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 较福建南亚热带高 20% 以上。

2.2 1982—2018 年耕地土壤碳源/汇大小

如图 3 所示, 福建省耕地具有“源”与“汇”双重功能, 但不同行政区域、土壤类型、利用类型和气候带在土壤碳源/汇中的贡献差异较大。莆田市耕地总体为碳源, 近 40 年土壤有机碳密度下降了 $0.31 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 其他市域耕地为碳汇, 且福州市、厦门市和泉州市有机碳密度上升幅度均超过 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。土壤类型以水稻土和红壤的固碳增汇作用最明显, 有机碳密度分别上升了 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 而“碳源”土壤的碳损失强度呈滨海盐土 ($0.23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 风砂土 ($0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 紫色土 ($0.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 黄壤 ($0.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 赤红壤 ($0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。水田土壤和福建中亚热带耕地土壤碳汇效应显著, 有机碳密度分别上升 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 单位面积固碳增量明显高于水浇地和福建南亚热带耕地; 旱地土壤为碳源, 有机碳密度下降 $0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

表 1 1982 年和 2018 年福建省不同区域/土类/土地利用类型/气候带耕地土壤有机碳密度

Table 1 Farmland soil organic carbon density in different regions/soil groups/land use types/climatic zones of Fujian Province in 1982 and 2018

区域/土类/土地利用类型/气候带 Regions/Soil groups/Land use types/Climatic zones	1982 年 Year 1982				2018 年 Year 2018			
	最小值	最大值	平均值	变异系数	最小值	最大值	平均值	变异系数
	Minimum/	Maximum/	Mean/	Coefficient	Minimum/	Maximum/	Mean/	Coefficient
	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	of variation/%	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	of variation/%
行政区 Administrative regions								
三明市 Sanming City	2.45	3.77	3.18	7.08	2.13	4.70	3.24	10.58
南平市 Nanping City	2.59	3.88	3.19	8.22	1.25	5.53	3.29	12.43
厦门市 Xiamen City	1.87	3.03	2.53	7.18	2.20	3.80	2.83	7.71
宁德市 Ningde City	2.19	3.74	2.92	10.86	1.22	6.37	2.99	17.69
泉州市 Quanzhou City	1.65	3.29	2.40	15.73	1.29	4.02	2.51	17.06
漳州市 Zhangzhou City	1.64	3.50	2.65	12.24	0.76	4.21	2.67	17.70
福州市 Fuzhou City	1.68	3.58	2.37	17.11	0.68	5.11	2.67	26.55
莆田市 Putian City	1.71	3.25	2.55	12.59	0.40	4.33	2.23	25.71
龙岩市 Longyan City	2.68	3.89	3.24	6.86	1.81	5.48	3.30	18.74
土类 Soil groups								
水稻土 Paddy soils	1.64	3.89	2.87	14.25	0.47	6.28	2.97	18.56
滨海盐土 Coastal solonchaks	1.65	3.22	2.19	12.68	0.79	3.88	1.96	24.57
潮土 Fluvo-aquic soils	1.65	3.74	2.56	20.65	1.29	6.17	2.58	19.57
石灰土 Lithosols	1.97	3.65	2.87	12.83	1.90	3.97	2.91	17.50
紫色土 Purplish soils	2.38	3.62	3.12	8.55	1.24	4.08	2.93	17.42
红壤 Red soils	1.68	3.83	2.81	13.35	0.70	6.37	3.09	15.38
赤红壤 Latosolic red soils	1.65	3.19	2.23	15.25	0.40	4.01	2.12	21.65
风砂土 Aeolian soils	1.64	2.89	2.08	8.55	0.68	3.43	1.86	23.39
黄壤 Yellow soils	2.26	3.77	3.01	12.79	1.23	5.03	2.85	23.77
土地利用类型 Land use types								
水田 Paddy fields	1.65	3.89	2.89	13.70	0.92	6.37	2.99	17.99
旱地 Dry-land	1.64	3.82	2.35	20.64	0.48	5.91	2.31	28.25
水浇地 Irrigated land	1.64	3.83	2.42	16.71	0.40	5.32	2.46	20.80
气候带 Climatic zones								
福建中亚热带 Middle subtropics of Fujian	1.68	3.89	3.02	11.64	0.68	6.37	3.16	15.95
福建南亚热带 South subtropics of Fujian	1.64	3.74	2.52	15.62	0.40	5.22	2.53	21.56

从碳源/汇的面积比例来看(表 2), 全省不同区域耕地的碳汇面积比例介于 24.20%~97.52%, 其中, 市域以厦门市耕地土壤的碳汇面积比例最高, 达 97.52%, 土壤类型、利用类型和气候带分别以红壤、

水浇地和福建中亚热带耕地土壤的碳汇面积比例最高, 分别达 65.86%、58.31%和 59.99%, 说明过去的 30 多年这些区域大多数耕地土壤发挥了固碳增汇功能。不同区域碳汇耕地的增汇强度以有机碳密度上升

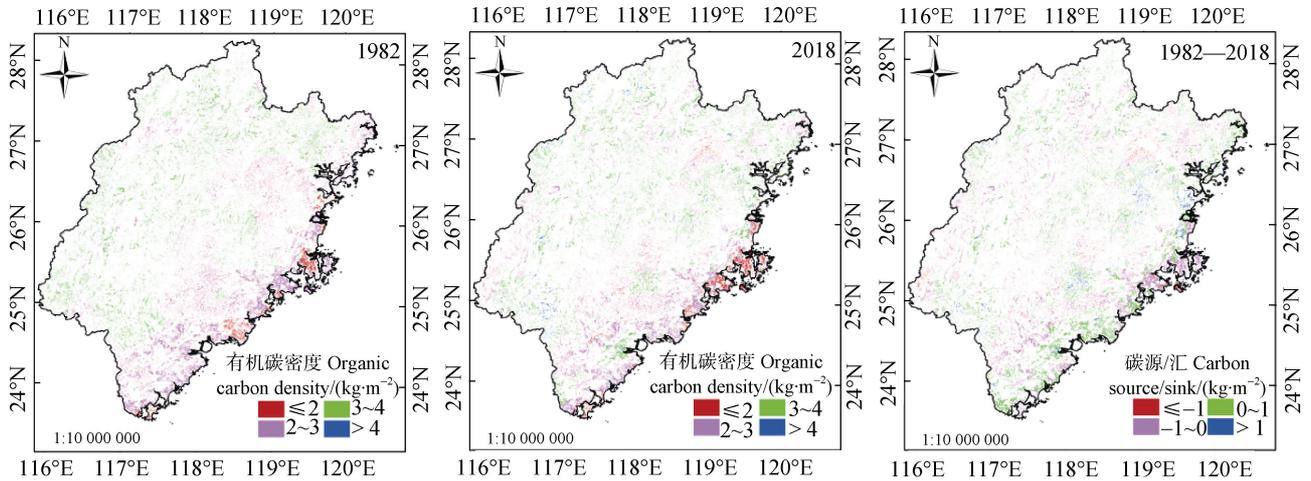


图2 福建省耕地土壤有机碳密度时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distributions of the farmland soil organic carbon density in Fujian Province

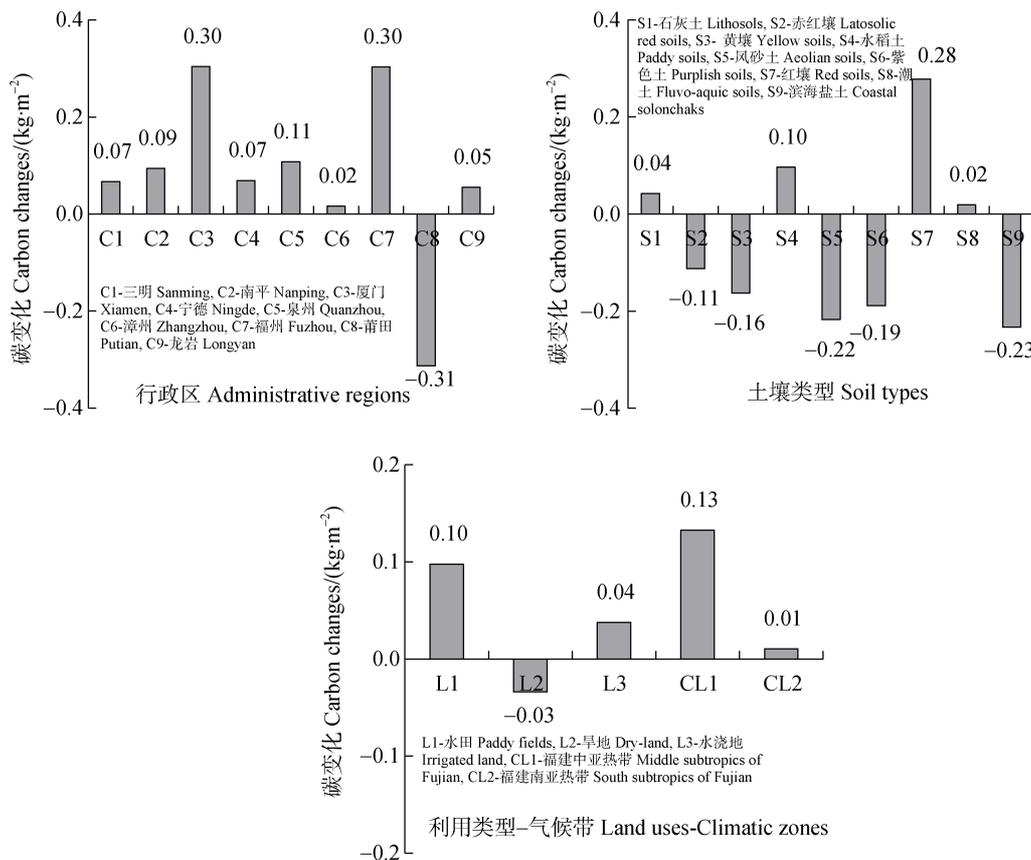


图3 1982—2018年福建省不同区域/土类/土地利用类型/气候带耕地土壤有机碳密度变化

Fig. 3 Changes in farmland soil organic carbon density in different regions/soil groups/land use types/climatic zones of Fujian Province from 1982 to 2018

0~1 kg·m⁻²为主,占相应区域碳汇总面积的70%以上。不同区域耕地土壤发生碳损失的面积比例为 2.48%~75.80%,以莆田市、滨海盐土、旱地和福建南亚热带耕地土壤的碳源面积比例较高,均达50%以上。不同

区域耕地碳损失强度以有机碳密度下降 0~1 kg·m⁻²为主,占相应区域碳源总面积的80%以上。

2.3 1982—2018年耕地土壤碳库重心变化规律

1982—2018年福建省不同区域耕地土壤碳库重

表 2 1982—2018 年福建省不同区域/土类/土地利用类型/气候带耕地土壤碳源/汇面积比例

Table 2 Area ratio of farmland soil carbon source/sink in different regions/soil groups/land use types/climatic zones of Fujian Province from 1982 to 2018

区域/土类/土地利用 类型/气候带 Regions/Soil groups/Land use types/Climatic zones	面积比例 Area ratio/%				区域/土类/土地利用类型/气候带 Regions/Soil groups/Land use types/Climatic zones	面积比例 Area ratio/%			
	≤-1	-1~0	0~1	>1		≤-1	-1~0	0~1	>1
行政区 Administrative regions	/ (kg·m ⁻²)				土类 Soil groups	/ (kg·m ⁻²)			
三明市 Sanming City	0.29	44.32	53.77	1.62	水稻土 Paddy soils	2.04	41.75	51.25	4.96
南平市 Nanping City	0.90	37.79	60.86	0.44	滨海盐土 Coastal solonchaks	1.66	70.90	26.84	0.60
厦门市 Xiamen City	—	2.48	97.52	—	潮土 Fluvo-aquic soils	0.38	50.91	46.56	2.14
宁德市 Ningde City	6.28	36.92	52.81	3.99	石灰土 Lithosols	—	52.98	45.45	1.58
泉州市 Quanzhou City	1.78	42.90	49.81	5.51	紫色土 Purplish soils	8.94	48.62	41.97	0.47
漳州市 Zhangzhou City	0.09	52.02	46.18	1.71	红壤 Red soils	0.93	33.21	56.76	9.10
福州市 Fuzhou City	0.57	37.92	44.26	17.25	赤红壤 Latosolic red soils	2.93	57.54	39.13	0.40
莆田市 Putian City	7.25	68.55	24.05	0.15	风砂土 Aeolian soils	9.13	54.54	36.33	—
龙岩市 Longyan City	5.74	40.21	47.73	6.32	黄壤 Yellow soils	12.32	40.34	42.94	4.40
土地利用类型 Land use types					气候带 Climatic zones				
水田 Paddy fields	1.96	42.19	50.86	4.99	福建中亚热带 middle subtropics of Fujian	3.12	36.90	53.87	6.11
旱地 Dry-land	3.81	50.50	42.60	3.09	福建南亚热带 South subtropics of Fujian	1.10	50.85	45.28	2.78
水浇地 Irrigated land	1.21	40.48	56.73	1.57					

心时空变异差异较大, 有机碳密度重心迁移方向、角度和距离各不相同(图4)。碳汇土壤以水稻土、潮土、红壤、水田、水浇地及三明市耕地的有机碳密度重心向东北方向迁移, 说明近40年这些土壤以东北区域的有机碳密度上升较多, 碳汇效果更显著; 对比垂直(南北)与水平(东西)方向变异强度发现, 区域耕地有机碳密度重心分别向东(高经度)迁移了 0.0217° 、 0.0382° 、 0.0546° 、 0.0233° 、 0.0033° 和 0.0062° , 均强于向北(高纬度)迁移, 即向东变异程度大于向北, 表明该区域东部耕地的单位面积土壤固碳增汇量大于北部耕地; 南平、泉州等市域碳汇土壤和福建南亚热带碳汇土壤均以西南部耕地土壤有机碳密度上升较多, 厦门、宁德、漳州、龙岩等市域碳汇土壤和石灰土碳汇以东南部耕地土壤有机碳密度上升较多, 福州市碳汇土壤以西北部耕地土壤有机碳密度上升较多。从碳源土壤来看, 滨海盐土、赤红壤、风砂土、紫色土有机碳密度重心

向西南方向迁移, 且向西变异强于向南, 即这些土壤均以西南区域耕地有机碳密度下降较少, 且西部区域有机碳密度下降幅度低于南部区域; 而莆田市、旱地、黄壤等区域耕地分别以西北、东南、西北部土壤有机碳密度下降较少。

3 讨论

耕地碳库的时空分布与变化是人为干扰等外部因素及土壤内部属性特征综合作用的结果。闽西北市域和福建中亚热带耕地的有机碳密度均分别高于闽东南市域和福建南亚热带, 该规律与区域气候条件相吻合。如图5所示, 闽东南市域和福建南亚热带年均气温分别为 20.3°C 和 20.5°C , 较闽西北市域和福建中亚热带的 18.4°C 高 2°C , 而年降水量(1442 mm 和 1446 mm)明显低于闽西北和福建中亚热带(1694 mm 和 1668 mm)。有研究表明, 高

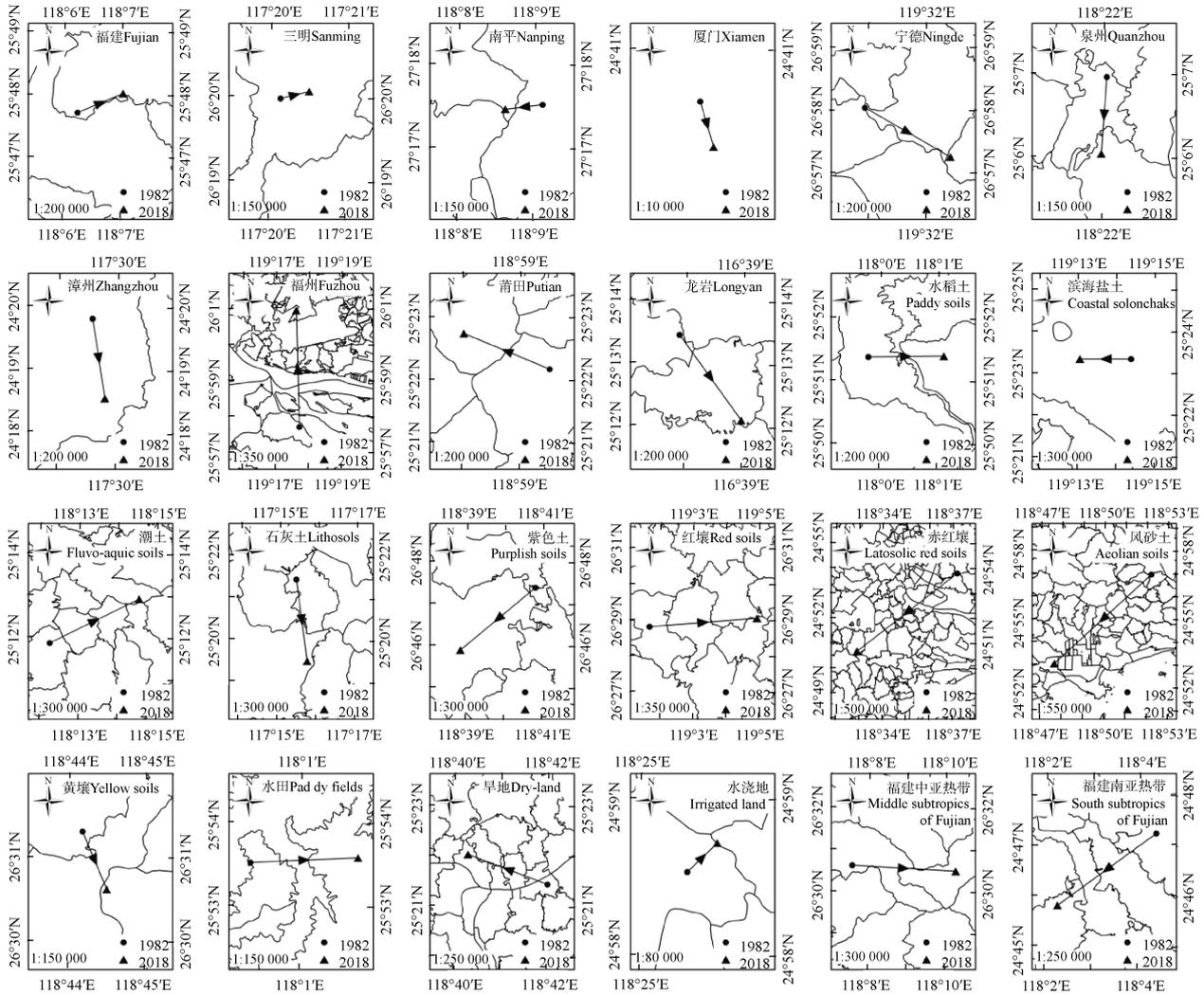


图 4 1982—2018 年福建省耕地土壤有机碳密度重心变异轨迹示意图

Fig. 4 Migration trajectory of the gravity center of farmland soil organic carbon density from 1982 to 2018 in Fujian Province

温少雨的气候环境有利于土壤微生物活动，促进有机质矿化而快速分解，所以闽东南和福建南亚热带耕地土壤有机碳通常难以稳定积累，这也与大多数学者认为的“土壤有机碳与气温负相关、与降水量正相关”论述相一致^[32-33]。当前全球正经历以变暖为主、极端事件趋强趋频的变化趋势，DNDC 模型模拟结果表明，温度升高 2℃、4℃ 和 6℃ 情景下福建省水田土壤虽然仍为“碳汇”，但年均固碳速率较常规温度情景下降 18%、39% 和 58%^[34]。也有学者基于 DNDC 模型评估了极端高温和长期变暖对福建省漳州市水田土壤有机碳的影响，认为未来频发的极端高温事件可能在一定程度上造成更大的碳损失^[35]。

施肥是提升土壤养分、促进粮食增产的重要措施，研究区各县（市、区）氮肥（折纯）施用量统

计数据表明，近 40 年研究区纯氮施用量总体呈上升趋势（图 5），特别是闽西北市域 2008 年纯氮施用量达 $548.77 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，为 1982 年的 2 倍多。氮肥施用对土壤酶活性、微生物群落组成和植物分泌物具有重要作用，不仅直接导致土壤氮素来源增加，也间接导致土壤碳含量提升^[36-38]。闽东南市域经济较为发达，田间道路等农业基础设施相对完善，方便肥料等农业物资和有机物质投入，1982—2018 年纯氮施用量明显高于闽西北市域，这也是该区域处于高温少雨环境仍总体表现为碳汇的主要原因之一^[39]。化肥是粮食安全的压舱石，2021 年我国化肥施用量为 $6.34 \times 10^7 \text{ t}$ ，农田氮肥平均用量为 $191 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，是世界平均水平的 2.6 倍，但氮素利用率仅为 30%~35%^[40-41]。过量施肥及其低利用率导致大量化肥养分累积在土壤或损失到大气、水体等外部环境，

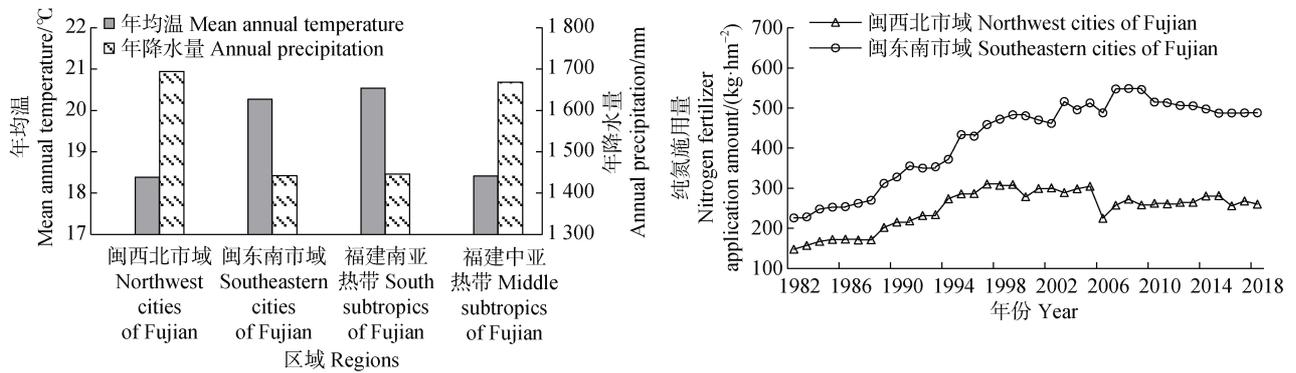


图 5 福建省气候条件及农用纯氮施用量

Fig. 5 Climate and agricultural nitrogen fertilizer application amount in Fujian Province

造成资源浪费和环境污染。基于此，我国启动测土配方施肥和化肥减量增效行动，2020 年农化化肥量较 2015 年下降 12.8%，但仍存在减量措施精准度不够等问题^[42]。福建省地处亚热带，水热条件较为优越，但人均耕地面积少、耕地图斑分散破碎，且土壤有机质及养分含量一般，未来应大力推进有机肥替代化肥、种养结合和秸秆高效还田，不断提升耕地固碳能力，以助力实现粮食安全和“双碳”目标。

质地特征可表征土壤的通气性和保肥性，对土壤碳组分的稳定性及分解速度具有重大影响^[19, 43]。如图 6 所示，福建省滨海盐土、潮土、赤红壤和风砂土的砂粒含量介于 66%~85%之间，明显高于其他土壤类型（50%~58%），砂粒含量丰富的土壤具有孔隙度大、通气性好、好氧微生物活性强等特点，土壤有机质矿化作用强烈而难以稳定积累，它们是福建省耕地有机碳密度最低的 4 类土壤^[44]。Konen 等^[45]也发现，耕地土壤有机碳与砂粒含量呈显著负相关

($r=-0.87^*$)。黄壤、水稻土、石灰土、红壤和紫色土的黏粒含量较高，且分布区域普遍高于滨海盐土、潮土、赤红壤和风砂土，特别是黄壤平均海拔高度达 979.27 m，高海拔低温多雨环境下土壤有机质分解缓慢；水稻土外源有机物质输入较多，长期淹水导致通气性较差，微生物活动弱而有机质容易积累，所以这些土壤的有机碳密度也较高^[6, 23]。不同土地利用类型以水田土壤黏粒含量最高、砂粒含量最低，一方面土壤湿度较高而通气不畅，好氧微生物活动常受抑制，且黏粒的巨大比表面积具有更强的土壤有机质吸附能力，可与腐殖质等大分子有机物质形成稳固的有机无机团聚体而不易被矿化分解，所以水田是福建省耕地土壤有机碳密度最高、固碳增汇效应最明显的土地利用方式^[46-47]。旱地土壤通气状况良好，有机质矿化速率较快，有机碳密度显著低于水田，是福建省唯一的碳源土地利用类型，这与很多学者的研究结果一致^[48-49]。第三次全国国土调查显示，福建省水田和旱地面积占比分别为 84.82%

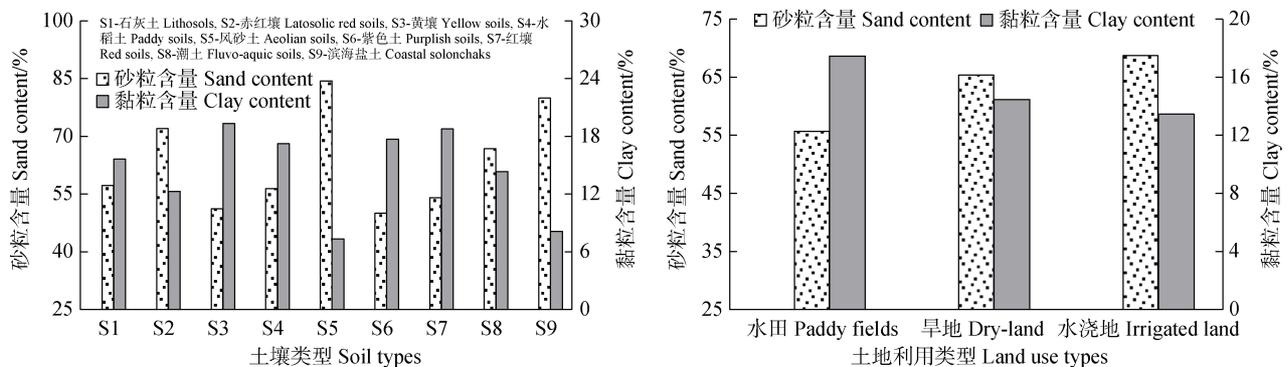


图 6 福建省耕地土壤质地特征

Fig. 6 Soil texture of farmland in Fujian Province

和 11.76%，在粮食安全和“双碳”战略背景下，未来福建省要进一步巩固增强水田土壤碳汇功能，还需针对性防止旱地土壤碳损失，特别是莆田市旱地面积比例高达 33.19%，这也是该区域耕地总体表现为碳源的原因之一。

不同初始有机碳含量对自然环境和农业管理的敏感程度有所差异，相同固碳措施下较低的耕地土壤有机碳密度区域易产生更明显的增汇效果^[50-51]。如我国耕地土壤由于有较低的初始有机碳含量，东北三省以外的其他省份土壤总体为碳汇^[4, 10-12, 22]。1982 年福州、泉州和厦门等市域耕地土壤有机碳密度较低，2018 年土壤有机碳密度上升幅度高于其他市域。韩冰等^[52]关于土壤初始有机碳含量的敏感性分析结果表明，特定条件下土壤有机碳趋于某一稳定饱和状态，但持续耕作可能导致有机碳密度很高的土壤下降较多，这与本研究的紫色土、黄壤有机碳密度变化相吻合。1982 年福建省耕地有机碳密度最高的土壤类型为紫色土和黄壤，分别达到 $3.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3.01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，其 2018 年有机碳密度分别下降 $0.19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此，未来福建省耕地土壤固碳减排应重点关注土壤有机碳含量很高和很低的区域，一方面稳定高碳土壤的固碳作用，防止发生碳损失，还要着力提升低碳土壤的碳汇能力。

4 结 论

准确揭示耕地土壤有机碳时空变化可为粮食安全和“双碳”目标提供科学依据。本研究以 30 多万图斑和 5 万多样点建立的 1:1 万数据库为基础，利用优化的地统计学插值方法和重心迁移模型量化 1982—2018 年福建省不同区域耕地土壤有机碳时空变化。结果表明，1982—2018 年福建省耕地具有“源”与“汇”双重功能，且不同区域土壤在碳源/汇中的贡献差异很大。闽东南沿海市域和福建南亚热带耕地有机碳密度明显低于闽西北内陆和福建中亚热带区域，莆田市以外区域总体均为碳汇；水稻土和水田是全省最主要的碳汇土壤类型和土地利用类型，近 40 年单位面积耕地土壤固碳增加 $0.10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，滨海盐土、风砂土和旱地的碳源效应显著，有机碳密度下降 $0.23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。福

建省耕地碳库时空变化主要受人为干扰等外部因素及土壤内部属性特征综合影响，未来应根据不同区域土壤有机碳水平及其在碳源/汇中的贡献差异针对性制定耕地固碳减排措施。

参考文献 (References)

- [1] Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1051—1059. [沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1051—1059.]
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10—21.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623—1627.
- [4] Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 191—197. [赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 191—197.]
- [5] Zhang L M, Zheng Q F, Liu Y L, et al. Combined effects of temperature and precipitation on soil organic carbon changes in the uplands of Eastern China[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1105—1115.
- [6] Long J, Li J, Huang Q, et al. Effects of raster resolution on quantifying farmland soil organic carbon stock in various landforms of a complex topography, China[J]. *Geoderma Regional*, 2023, 34: e00668.
- [7] Luo M, Guo L, Zhang H T, et al. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 48—59. [罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 48—59.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279—2283. [于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳

- 密度及储量研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16 (12): 2279—2283.]
- [10] Qiu J J, Wang L G, Tang H J, et al. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37 (8): 1166—1171. [邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37 (8): 1166—1171.]
- [11] Chen D, Chang N J, Xiao J F, et al. Mapping dynamics of soil organic matter in croplands with MODIS data and machine learning algorithms[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 844—855.
- [12] Zhao M S, Li D C, Wang S H. Variation of soil organic carbon in farmland of Anhui and its influencing factors in the 30 years from 1980 to 2010[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (3): 595—605. [赵明松, 李德成, 王世航. 近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55 (3): 595—605.]
- [13] Shibabaw T, Rappe George M O, Gärdenäs A I. The combined impacts of land use change and climate change on soil organic carbon stocks in the Ethiopian Highlands[J]. *Geoderma Regional*, 2023, 32: e00613.
- [14] Wang X, Sanderman J, Yoo K. Climate-dependent topographic effects on pyrogenic soil carbon in southeastern Australia[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 121—130.
- [15] Sun T T, Wang Y G, Hui D F, et al. Soil properties rather than climate and ecosystem type control the vertical variations of soil organic carbon, microbial carbon, and microbial quotient[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107905.
- [16] Liu M H, Sui X, Hu Y B, et al. Microbial community structure and the relationship with soil carbon and nitrogen in an original Korean pine forest of Changbai Mountain, China[J]. *BMC Microbiology*, 2019, 19(1): 218.
- [17] Hussain S, Sharma V, Arya V M, et al. Total organic and inorganic carbon in soils under different land use/land cover systems in the foothill Himalayas[J]. *Catena*, 2019, 182: 104104.
- [18] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 139: 19—22.
- [19] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey 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.
- [20] Merriman L S, Moore T L C, Wang J W, et al. Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583: 133—141.
- [21] Willaerts B A, Oyonarte C, Muñoz-Rojas M, et al. Environmental factors controlling soil organic carbon stocks in two contrasting Mediterranean climatic areas of southern Spain[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27 (3): 603—611.
- [22] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, 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.
- [23] Zhang L M, Liu Y L, Li X D, et al. Effects of soil map scales on simulating soil organic carbon changes of upland soils in Eastern China[J]. *Geoderma*, 2018, 312: 159—169.
- [24] Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Dynamic change of soil total nitrogen density and storage in cropland of Fujian Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (12): 3959—3969. [龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 福建省耕地土壤全氮密度和储量动态变化[J]. 生态学报, 2015, 35 (12): 3959—3969.]
- [25] Long J, Liu Y L, Xing S H, et al. Optimal interpolation methods for farmland soil organic matter in various landforms of a complex topography[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105926.
- [26] Zhang X. Study on spatial acidification variation and its impacting factors of cropland soil[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. [张秀. 省域耕地土壤酸化空间分异及驱动因素研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.]
- [27] Zhang Z X, Yu Y L, Li Y Q, et al. Effects of grazing intensity on soil organic carbon and its spatial heterogeneity in desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (15): 6257—6266. [张子胥, 于倚龙, 李永强, 等. 放牧强度对内蒙古荒漠草原土壤有机碳及其空间异质性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41 (15): 6257—6266.]
- [28] Rong H F, Fang B. Measurement of the matching degree between urbanization and ecology in Anhui based on barycenter model[J]. *China Land Sciences*, 2017, 31(6): 34—41. [荣慧芳, 方斌. 基于重心模型的安徽省城镇化与生态环境匹配度分析[J]. 中国土地科学, 2017, 31 (6): 34—41.]
- [29] Wang Y, Hao L N, Xu Q, et al. Spatio-temporal variations of vegetation coverage and its geographical factors analysis on the Loess Plateau from 2001 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (6): 2397—2407. [王一,

- 郝利娜, 许强, 等. 2001—2019 年黄土高原植被覆盖度时空演化特征及地理因子解析[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2397—2407.]
- [30] Yang Y K, Chen S Z, Zhao R. Analysis on spatial distribution and evolution of main timber exchange market in China based on the gravity model[J]. *Forestry Economics*, 2018, 40(6): 64—69, 85. [杨羽昆, 陈绍志, 赵荣. 基于重心模型的中国主要木材交易市场空间分布演变分析[J]. 林业经济, 2018, 40(6): 64—69, 85.]
- [31] Cao J, Lin Z Y, Chen C Y, et al. Spatiotemporal pattern of the tea industry in Sichuan Province and its driving forces based on the geographical detector[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(4): 619—631. [曹杰, 林正雨, 陈春燕, 等. 基于地理探测器的四川省茶产业时空格局变化及驱动因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(4): 619—631.]
- [32] Dai E F, Zhai R X, Ge Q S, et al. Topsoil organic carbon storage and its changes in Inner Mongolia grassland from the 1980s to 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1651—1660. [戴尔阜, 翟瑞雪, 葛全胜, 等. 1980s-2010s 内蒙古草地表层土壤有机碳储量及其变化[J]. 地理学报, 2014, 69(11): 1651—1660.]
- [33] Bakhshandeh E, Zeraatpisheh M, Soleimani A, et al. Land use conversion, climate change and soil organic carbon: Modeling a *Citrus* garden chronosequence in northern Iran[J]. *Geoderma Regional*, 2022, 30: e00559.
- [34] Che Y, Qiu L X, Wu L Y, et al. Response of soil organic carbon accumulation in paddy fields in Fujian Province to future temperature increases[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2775—2785. [车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 等. 福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2775—2785.]
- [35] LI J, Chen W M, Sun J R, et al. Assessing the impacts of extreme high temperatures and long-term warming on paddy soil organic carbon based on the DNDC Model-A case study in Zhangzhou of Fujian Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(3): 665—676. [李晶, 陈伟明, 孙佳蕊, 等. 基于 DNDC 模型评估极端高温和长期变暖对水田土壤有机碳的影响——以福建省漳州市为例[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 665—676.]
- [36] Xiang J, Wang Z F, Wang Y G, et al. Effects of long-term different fertilizations on soil carbon content and profile distribution in desert cropland in Xinjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 333—341. [向姣, 王著峰, 王玉刚, 等. 长期不同施肥对新疆荒漠农田土壤碳含量及其剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 333—341.]
- [37] Suo W K, Yang J H, Hu C Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer and soil conditioner on soil carbon and nitrogen content, and oat yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(6): 858—867. [索文康, 杨金翰, 胡晨阳, 等. 氮肥和调理剂对土壤碳氮含量及莜麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(6): 858—867.]
- [38] Hu Q Y, Liu T Q, Ding H N, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil microbial residues and their contribution to soil organic carbon and total nitrogen in a rice-wheat system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 181: 104648.
- [39] Chen Z X, Qiu L X, Chen H Y, et al. Enrichment and ecological risk assessment of available phosphorus in paddy soil of Fujian Province over past 40 years[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3741—3751. [陈中星, 邱龙霞, 陈瀚阅, 等. 近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3741—3751.]
- [40] Zheng S, Yin K Q, Yu L H. Factors influencing the farmer's chemical fertilizer reduction behavior from the perspective of farmer differentiation[J]. *Heliyon*, 2022, 8(12): e11918.
- [41] Zhang F S, Shen J B, Wei C Z, et al. Green intelligent fertilizer: From interdisciplinary innovation to industrialization realization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 873—887. [张福锁, 申建波, 危常州, 等. 绿色智能肥料: 从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 873—887.]
- [42] Zhou W, Ding W C. Strategic researches of reducing fertilizer use and increasing use efficiency in China in the new era[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(1): 1—7. [周卫, 丁文成. 新阶段化肥减量增效战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 1—7.]
- [43] Gao W J, Xia B, Lu Y Y, et al. Characteristics of spatial distribution of soil organic carbon in Anhui Province based on soil profile occurrence layer and environmental variables[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(3): 677—691. [高文静, 夏冰, 芦园园, 等. 基于土壤剖面发生层和环境变量的安徽省土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2025, 62(3): 677—691.]
- [44] Swetha R K, Chakraborty S. Combination of soil texture with Nix color sensor can improve soil organic carbon prediction[J]. *Geoderma*, 2021, 382: 114775.
- [45] Konen M E, Burras C L, Sandor J A. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in north central Iowa[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1823—1830.
- [46] Hu Y J, Kong X B, Yao J T. Vertical distribution of soil organic carbon in Plains areas of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 561—570. [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.]

- [47] Rong G H, Zhang X J, Wu H Y, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen mineralization and their temperature sensitivity in response to afforestation across China's Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 202: 105226.
- [48] Li A W, Ran M, Song L Y, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of cropland topsoil organic carbon content in the Sichuan Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32 (5): 1102—1112. [李艾雯, 冉敏, 宋靛颖, 等. 四川盆地耕地表层土壤有机碳含量空间分布特征及其影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32 (5): 1102—1112.]
- [49] Jiang Y F, Rao L, Guo X, et al. Study on main controlling factors of spatial variability of farmland SOC in Jiangxi Province[J]. *Soils*, 2018, 50 (4): 778—786. [江叶枫, 饶磊, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究[J]. *土壤*, 2018, 50 (4): 778—786.]
- [50] Nicolas W, Cecilia C, Hernán A, et al. The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas[J]. *Catena*, 2022, 212: 106126.
- [51] Xie E Z, Zhang Y X, Huang B, et al. Spatiotemporal variations in soil organic carbon and their drivers in Southeastern China during 1981—2011[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104763.
- [52] Han B, Wang X K, Ouyang Z Y. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China[J]. *Rural Eco-environment*, 2005, 21 (4): 6—11. [韩冰, 王效科, 欧阳志云. 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*, 2005, 21 (4): 6—11.]

(责任编辑：檀满枝)