

DOI: 10.11766/trxb202112280700

罗玉叶, 邱龙霞, 龙军, 陈瀚阅, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明. 不同秸秆还田率情境下亚热带水田土壤的“碳汇”贡献模拟研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1442–1455.

LUO Yuye, QIU Longxia, LONG Jun, CHEN Hanyue, WU Ting, LI Jing, XING Shihe, ZHANG Liming. Research on the Carbon Sink Contribution of Subtropical Paddy Field Soil Under Different Straw Return Rates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1442–1455.

## 不同秸秆还田率情境下亚热带水田土壤的“碳汇”贡献模拟研究\*

罗玉叶<sup>1, 2</sup>, 邱龙霞<sup>1, 2</sup>, 龙军<sup>3</sup>, 陈瀚阅<sup>1, 4</sup>, 毋亭<sup>1, 2</sup>, 李晶<sup>1, 2</sup>,  
邢世和<sup>1, 2</sup>, 张黎明<sup>1, 2†</sup>

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 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; 3. 闽南师范大学生物科学与技术学院, 福建漳州 363000; 4. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**明确不同秸秆还田量对土壤“碳汇”的贡献大小是合理制定农业碳中和措施的基础。以我国典型亚热带地区——福建省水田土壤为研究对象, 基于 2016 年 15 833 个土壤样点实测数据和目前该地区最详细的 1:5 万大比例尺土壤数据库, 运用农业生态系统中广泛使用的 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模型模拟了不同秸秆还田率下全省未来的土壤有机碳动态变化。结果表明, 2017—2053 年传统管理 (15%) 以及秸秆还田 30%、50% 和 90% 下水田土壤的年均固碳速率分别为 173、302、478 和 838 kg·hm<sup>-2</sup>, 固碳总量分别为 11.56、20.15、31.90 和 55.95 Tg。从土壤亚类来看, 咸酸和盐渍水稻土的年均固碳速率最大, 不同秸秆还田率下介于 220~920 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间; 而渗育和潜育水稻土的固碳量最大, 不同秸秆还田率下合计介于 9.45~45.52 Tg 之间, 约占研究区总固碳量的 81%。从行政区来看, 龙岩、泉州两个地级市的固碳速率和总量均最大, 不同秸秆还田率下均分别在 202~937 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 1.55~8.34 Tg 之间。总体而言, 福建省水稻土亚类和行政区在不同秸秆还田率下的固碳潜力差异很大, 应有针对性制定“固碳减排”管理措施。

**关键词:** 秸秆还田; 土壤有机碳; 水田; 1:5 万数据库; DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模型

中图分类号: S15 文献标志码: A

## Research on the Carbon Sink Contribution of Subtropical Paddy Field Soil Under Different Straw Return Rates

LUO Yuye<sup>1, 2</sup>, QIU Longxia<sup>1, 2</sup>, LONG Jun<sup>3</sup>, CHEN Hanyue<sup>1, 4</sup>, WU Ting<sup>1, 2</sup>, LI Jing<sup>1, 2</sup>, XING Shihe<sup>1, 2</sup>,  
ZHANG Liming<sup>1, 2†</sup>

\* 国家自然科学基金项目 (41971050)、福建省自然科学基金项目 (2020J05027)、遥感科学国家重点实验室开放基金项目 (OFSLRSS202112) 和教育部人文社科青年基金项目 (21YJC630090) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971050), the National Natural Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2019J01660), Open Fund of Key Laboratory of Remote Sensing Science (No. OFSLRSS202112) and Young Foundation of Ministry of Education, Humanities and Social Science (No. 21YJC630090)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fjaulmzhang@163.com

作者简介: 罗玉叶 (1994—), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环模拟的研究。E-mail: 1YYe528@163.com

收稿日期: 2021-12-28; 收到修改稿日期: 2022-07-21; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-09-19

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou 350002, China; 3. College of Biological Science and Technology, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 4. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** 【 Objective 】 Straw returning is generally considered to be an effective way to increase soil “carbon sink” and mitigate climate change. China is rich in straw resources, but the rate of straw returning to the field is less than 20%, which is the main reason for a long-term deficit of carbon pool in farmland soils in China. There are many kinds of straw resources in subtropical region, which also account for about 30% of the total output of the country. Therefore, clarifying the quantitative relationship between the amount of straw returning and soil carbon sink in subtropical areas of China is an important basis for formulating carbon sequestration measures and implementing national strategies such as carbon neutralization. 【 Method 】 Paddy soil in Fujian Province, a typical subtropical region in China, was selected as our study area. The spatial database was constructed by the digitization of 1 : 50 000 soil map paper data from 84 counties (cities and districts) in Fujian Province during the second soil census in 1982. The soil attribute database is composed of 15 833 surface samples from the arable land fertility survey conducted by the Ministry of Agriculture and Rural Areas in 2016. ArcGIS software and the PKB method (Pedological Knowledge-Based Method) connect the spatial data and attribute data in a 1 : 50 000 soil database. Using the latest established 1 : 50 000 soil database and DNDC (DeNitrification and DeComposition) model widely used in the agricultural ecosystem, the future dynamic changes of soil organic carbon under different rates of straw returned in Fujian Province were simulated. 【 Result 】 Results showed that the average annual carbon sequestration rates can reach 173 302 478 and 838 kg·hm<sup>-2</sup>, and the sequestration of carbon amounts were 11.56, 20.15, 31.90 and 55.95 Tg during the period of 2017-2053 under the treatments of conventional management (15%), straw returning of 30%, 50%, and 90%, respectively. Straw was returned to the field from the perspective of carbon sequestration rate, the average annual carbon sequestration rates of Acid sulfate paddy soils and Salinized paddy soils were the highest, which ranged from 220 to 920 kg·ha<sup>-1</sup> under different straw returning rates. In terms of total carbon sequestration, the total carbon sequestration of Percogenic paddy soils and Hydromorphic paddy soils under different straw returning rates accounted for 81% of the total carbon sequestration over the whole province. Considering the administrative areas, the average annual carbon sequestration rate and total amount in Longyan and Quanzhou were relatively large, ranging from 202~937 kg·hm<sup>-2</sup> and 1.55~8.34 Tg under different straw returning rates, respectively. 【 Conclusion 】 In general, the increase in straw returning ratio contributed significantly to the “carbon sink” of paddy soil in Fujian Province, which is worth promoting. However, under different straw returning rates, due to the influence of soil properties, climate, fertilization and other factors, the contribution of different soil subtypes and administrative regions in Fujian Province to carbon sequestration varies greatly. In the future, it is necessary to formulate reasonable management measures for carbon sequestration and emission reduction for different soil types and prefecture-level cities.

**Key words:** Straw returning; Soil organic carbon; Paddy field; 1 : 50 000 database; DNDC (Denitrification and DeConstruction) model

气候变化是当今社会面临的重大挑战，由于人类活动和化石燃料的燃烧，自工业革命以来大气中二氧化碳（CO<sub>2</sub>）浓度不断升高，据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告，2019年大气中CO<sub>2</sub>浓度年平均含量高达410×10<sup>6</sup>，是2000年的1.11倍，并且正在以每年平均0.5%的速度增加，如何通过多种途径减少CO<sub>2</sub>等温室气体排放量已成为全球关注的热点<sup>[1]</sup>。有研究表明，约5%

的温室气体排放源于农业生产，而秸秆还田能使全球增温潜势（Global Warming Potential, GWP）降低17.9%~19.8%<sup>[2]</sup>。此外，秸秆还田还有利于土壤团聚体形成，改善土壤结构和提高土壤肥力<sup>[3]</sup>。因此，明确不同秸秆还田量下农田土壤的“碳汇”贡献对我国合理制定固碳减排措施和实现2060年的碳中和皆具有重要意义。

农田生态系统中碳循环的源、库、流及其反馈

机制在人为干扰下会变得非常复杂,大多数因果关系是非线性的,为了描述和预测这一复杂过程,应用生物地球化学模型成为一种重要方法<sup>[4]</sup>。基于此,我国学者基于目前广泛使用的该类模型对不同秸秆还田量下的碳变化在国家尺度<sup>[5-8]</sup>和区域尺度<sup>[9-11]</sup>上做了大量研究。但从目前的研究来看,由于获取详细土壤数据及建立矢量数据库等不易,在省级等大区域尺度上的秸秆还田研究多集中于中小比例尺土壤数据库,而使用 1:5 万大比例尺土壤数据库进行有机碳变化的研究较少。很多研究表明,在特定的管理条件下,土壤属性空间异质性是造成有机碳模拟不确定性主要来源,且粗糙的土壤数据可以降低有机碳模拟精度超过 360%<sup>[12-13]</sup>。此外,目前农田生态系统广泛使用的生物地球化学过程模型(如 DNDC),大多基于“县”为最小模拟单元,这在一定程度上会导致“县”内不同土壤类型面积权重和属性空间异质性得不到充分反映,从而增加模拟结果的误差<sup>[12-13]</sup>。因此,有必要在省域等大区域尺度建立大样本实测样点支撑的详细土壤数据库,并基于该数据库划分更精细的土壤有机碳模拟单元,以提高生物地球化学过程模型的模拟精度。我国的秸秆资源量每年大约有  $1.0 \times 10^{12}$  kg,占世界秸秆产量的近 25%,但秸秆还田率小于 20%,是农田土壤碳库长期处于亏损状态的主要原因<sup>[14-15]</sup>。亚热带地区作为我国的重要农作物区,不仅秸秆资源种类多,而且产量大,约占全国总量的 30%,明确该地区秸秆还田量与土壤“碳汇”之间定量关系是合理制定我国“碳中和”国家战略的重要基础<sup>[16]</sup>。基于此,本研究以目前农田生态系统广泛使用的 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模型为工具,选择我国典型亚热带地区一整个福建省 84 个县(市、区)水田作为研究对象,以 2016 年 15 833 个农业农村部耕地地力调查样点数据,1980—2016 年气象资料和 2016 年农业管理措施为基础,采用改进的、充分体现土壤属性空间异质性的 1:5 万大比例尺土壤图“图斑(polygon)”为最小模拟单元,模拟 2017—2053 年全省水稻土在传统管理(秸秆还田 15%)以及秸秆还田 30%、50%和 90%下的有机碳变化,系统分析整个研究区、不同行政区和水稻土亚类在各个秸秆还田量措施下的有机碳变化规律,明确秸秆还田量与土壤“碳汇”之间的定量关系,结果可为我国亚热带地区实施合理的固碳减排政策和制定有效的秸秆管理措施

提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

福建省(23°33'—28°20'N, 115°50'—120°40'E)位于我国东南沿海,东北与浙江省相连、西南与广东省交界、西北与江西省毗邻,东与台湾海峡相隔(图 1)。气候类型为亚热带海洋性季风气候,年日照时数为 1 700~2 300 h,年均气温为 15.8~21.7 °C,年均降水量为 1 015~1 923 mm<sup>[17]</sup>。全省耕地土壤类型以水稻土为主,占耕地总面积的 82.63%,因其成土过程和水分移动形式的不同,可划分为淹育水稻土、渗育水稻土、潴育水稻土、潜育水稻土、漂洗水稻土、盐渍水稻土和咸酸水稻土 7 个亚类<sup>[18]</sup>。

### 1.2 DNDC 模型

DNDC 模型<sup>[19]</sup>最早由美国 New Hampshire 大学 Li 等建立,主要由气候、植物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵 6 个子模型组成。该模型由于运用氧化还原反应和能斯特方程等生物地球化学理论来观察、分析和预测陆地生态系统碳循环,并以日或小时为步长传递信息,进行模拟真实环境条件下植物生长与土壤化学性质间的相互作用。因此,在亚洲、欧洲和美洲等地区的许多国家得到了广泛应用,并逐渐成为全球性模型<sup>[20-21]</sup>。此外,该模型也经过我国科学家的不断改进和扩充,发展了适用于中国特有农业生态系统的版本,改进后的模型针对土壤有机碳变化进行了大量验证,并在点位和区域尺度上进行了广泛应用<sup>[22]</sup>。为了更好地保证 DNDC 模型在福建省水田土壤有机碳研究中的可靠性,本研究以 1980 年第二次土壤普查 1 471 个水稻土剖面建立的 1:5 万土壤数据库,以及 1980—2016 年气象资料和农业管理措施为基础,模拟全省水稻土 1980—2016 年的有机碳动态变化,并将 2016 年的模拟值与 6 880 个实测样点数据的均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、相对误差(E)和皮尔逊相关系数( $r$ ) 4 项统计指标进行比较。相关指标计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (1)$$

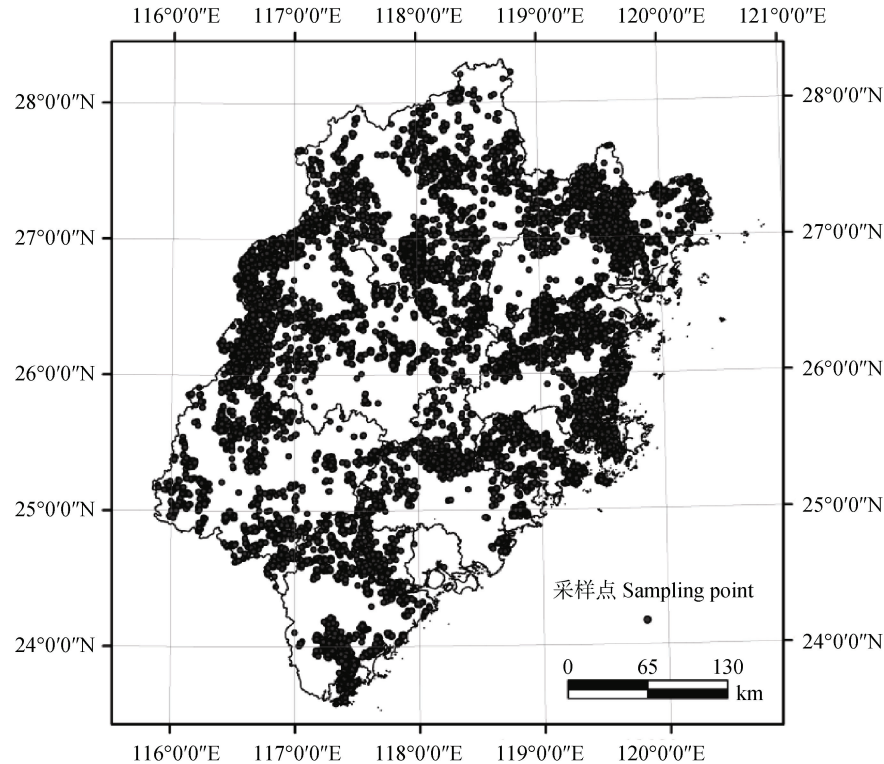


图 1 福建省 2016 年水稻土采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of paddy soil sampling points in Fujian Province in 2016

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(O_i - P_i) \quad (2)$$

$$E = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{V_{oi} - V_{pi}}{V_{oi}} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

式中， $O$  为实测值， $\bar{O}$  为所有实测值的平均值， $P$  为模拟值， $\bar{P}$  为所有模拟值的平均值， $n$  为模拟值与实测值对应的数据数目（6 880 个）。 $r$  值越大，RMSE 和 MAE 值越小，表明模型模拟值和实测值一致性较高； $E < \pm 5\%$  或介于  $\pm 5\% \sim \pm 10\%$  之间，表明模型模拟结果准确度很高或可行<sup>[23]</sup>。

### 1.3 数据来源

本研究使用的福建省 1:5 万大比例尺土壤数据库由空间数据库和属性数据库两部分构成。空间数据库是通过数字化 1982 年第二次土壤普查的全

省 84 个县（市、区）1:5 万土壤图纸质资料建立的，该数据库共有水稻土图斑 181 756 个。属性数据库由 2016 年农业农村部耕地地力调查 15 833 个表层样点建立的（图 1），该数据库包含了 DNDC 模型所需的大量理化性质（如，质地、有机质含量和 pH 等）。空间数据和属性数据的融合采用 Shi 等<sup>[24]</sup>提出的“PKB（Pedological Knowledge-Based Method）”法；即利用地理信息系统平台，根据土壤类型一致与相似性、土壤成土母质相同或相近、土壤剖面点位置与分布区域一致或邻近等原则，以县（市、区）等行政单元作为基本控制区域，将土壤属性数据库中的每一个样点数据连接到空间数据库中相应的土壤类型图斑单元中。

本研究中的气象数据来自于福建省 28 个国家气象站，主要包括了 1980—2016 年逐日最高气温、最低气温和日降雨量等资料，没有气象站点的县基于“就近原则”，采用临近气象站点数据代替，模型运行时每个县所有土壤图的图斑均采用某一个气象站点数据进行模拟<sup>[10]</sup>。农业管理资料来源于 2016 年福建省农业统计年鉴，主要包括了肥料折纯量、耕作制度、作物产量数据、家畜数据和农业人口等数据。

容重是衡量土壤理化性质的一个重要指标, 本研究中为了计算福建省 2016 年土壤样点中部分容重缺失的数据, 对 2018 年 1982 个水田土壤实测点的容重与有机质含量进行了拟合, 回归方程为  $y = 2.033 - 0.234 \times \ln(\text{SOM})$  (式中 SOM 为有机质含量)。分析得土壤容重与有机质含量之间达到了极显著相关水平 ( $P < 0.001$ ), 相关系数为 0.722, 这也说明该公式适用于计算福建省土壤样点中缺失的容重数据。

#### 1.4 管理措施情景设置

为量化未来不同秸秆还田率下福建省水田土壤的有机碳变化, 本研究以 2016 年农田管理措施和 1980—2016 年气象数据为基础, 设置了 1 个基础管理措施和 3 种推荐管理措施情景。基础管理措施情景 (秸秆还田 15%) 代表当前福建省耕地实际的秸秆还田情况, 3 种推荐管理措施情景包括 30%、50% 以及 90% 的秸秆还田<sup>[23]</sup>。秸秆还田率指除作物地上部分收获种子外其余残留物粉碎后回归土壤的比例, 在田间管理措施执行中可根据地上部分生物量进行相应 30%、50% 以及 90% 比例进行机械粉碎还田<sup>[5, 25-28]</sup>。DNDC 模型运行中, 在基础管理措施的基础上仅改变秸秆还田比例, 然后将各种处理运行 37 年 (2017—2053 年), 分析秸秆还田率大小对福建省水田土壤固碳潜力的影响。

#### 1.5 数据统计分析

不同秸秆还田率下 2017—2053 年福建省整个地区、不同土壤类型和行政区的面积加权年均有机碳积累速率 (dSOC,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、有机碳变化总量 (TSOC, Tg) 计算公式如下:

$$\text{APS} = \sum_{i=1}^n \text{APS}_i \quad (5)$$

$$\text{AMSC} = \sum_{f=1}^h \text{ASC}_f \quad (6)$$

$$\text{TSOC} = \sum_{i=1}^n (\text{APS}_i \times \text{AMSC}_i) \quad (7)$$

$$\text{dSOC} = \text{TSOC} / \text{APS} / 37 \quad (8)$$

式中, APS 为研究区水田土壤总面积,  $\text{hm}^2$ ;  $\text{APS}_i$  表示土壤数据库中每个图斑面积,  $\text{hm}^2$ ;  $\text{ASC}_f$  为每

一个图斑年均土壤有机碳变化量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $\text{AMSC}_i$  为每个图斑年均土壤有机碳从 2017—2053 年的总变化量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $n$  代表图斑编号;  $h$  为 2017—2053 年的模拟年份 ( $h=1, 2, 3, \dots, 37$ )。

用增加率 (%) 来表示不同秸秆还田量对福建省水田土壤“碳汇”的贡献, 计算公式如下:

$$y = (X_s - X_0) / X_0 \times 100 \quad (9)$$

式中,  $y$  表示增加率 (%),  $X_s$  表示未来不同秸秆还田率下福建省土壤年均有机碳积累速率 dSOC (单位:  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) 或有机碳变化总量 TSOC (单位: Tg);  $X_0$  表示传统管理下福建省土壤年均有机碳积累速率或有机碳变化总量。

为了明确各气象和土壤属性因子对不同秸秆还田率下 2017—2053 年福建省水田土壤固碳速率的影响程度, 本研究采用 SMICA14.1 软件对影响因子进行偏最小二乘回归分析, 筛选出重要影响因子, 并分析各因子与年均固碳速率的相关性。进一步利用多元逐步回归和偏相关分析定量化各影响因子对不同秸秆还田率下年均固碳速率变异的解释度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型验证

图 2 为福建省 1:5 万土壤数据库下 2016 年水稻土有机碳模拟值和 6 880 个采样点分布。统计表明, 2016 年模拟的土壤有机碳含量变化范围在  $4.22 \sim 29.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 而实测值变化范围在  $0.35 \sim 33.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 模拟值 100% 在实测值范围内, 说明模拟值与实测结果基本相一致 (图 2)。进一步分析得土壤有机碳含量实测值与模拟值达到了极显著相关水平 ( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.41, 相对误差  $E$  为  $-8.18\%$  ( $E < \pm 10\%$ ), 说明模拟结果达到可行的标准; 此外, 平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 分别为  $4.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $5.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均相对比较小, 这说明 DNDC 模型可以用于福建省水田土壤有机碳的动态演变模拟。

### 2.2 不同秸秆还田率下福建省水稻土的碳汇贡献

在目前区域尺度最详细的 1:5 万土壤数据库下福建省水稻土有图斑 181 756 个, 面积为  $180 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。本研究根据 DNDC 模型估算出 2017—2053 年未来 37 年福建省水田在秸秆还田 15% (传统管理)、30%、50% 和 90% 下的土壤固碳总量分别为 11.56、20.15、

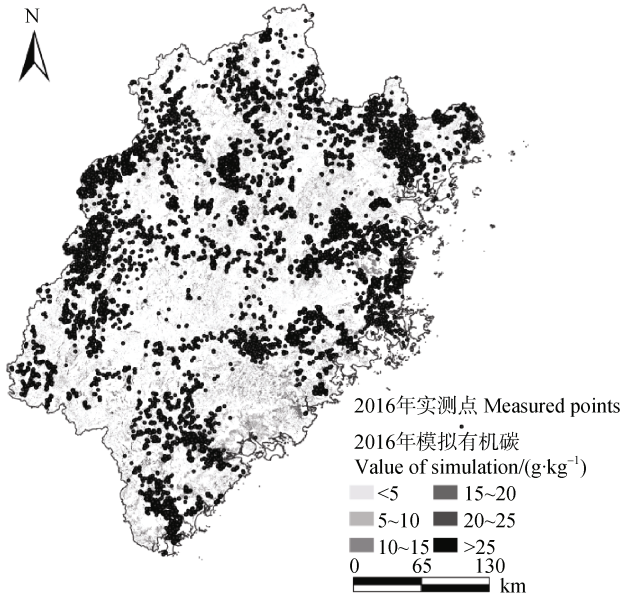


图2 2016年福建省1:5万土壤数据库下水田土壤有机碳实测点和模拟值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of verification points and simulated SOC values in the 1:50 000 soil database of Fujian Province in 2016

31.90 和 55.95 Tg, 年均固碳速率分别为 173、302、478 和 838  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与传统管理相比 (秸秆还田 15%), 秸秆还田 30%、50%和 90%的年均固碳速率

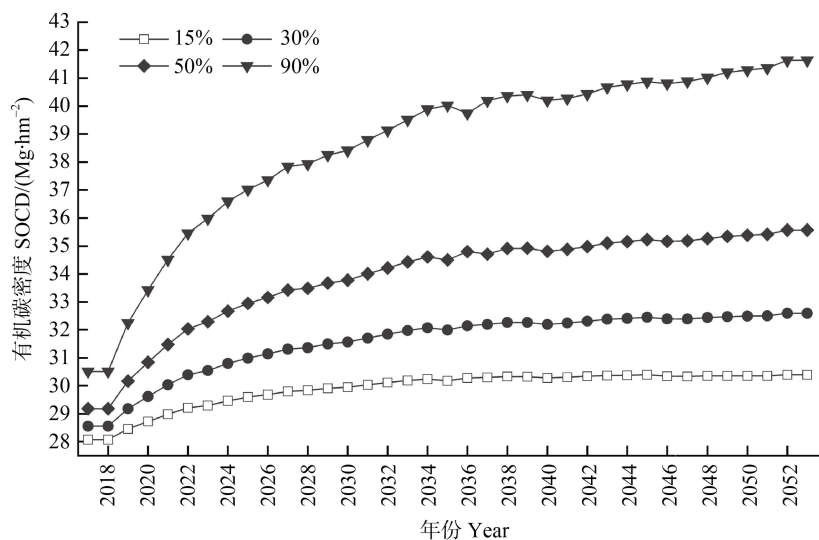


图3 不同秸秆还田率下 2017—2053 年福建省水田土壤有机碳密度年变化

Fig. 3 Changes in soil organic carbon density under different straw returning rates in Fujian Province from 2017 to 2053

从面积统计来看 (图 4), 传统管理措施下福建省水田土壤的年均固碳速率: <150、150~300、300~450、450~600、600~750 和 >750  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的面积, 分别占全省水田土壤总面积的 43.04%、43.31%、12.10%、1.48%、0.059%和 0.0045%。从空间分布来

增幅分别达到 74%、176%和 384% (图 3), 这与很多学者的“秸秆大量还田能显著提高农田土壤有机碳积累”研究结论相一致<sup>[29]</sup>。其主要原因是秸秆的大量输入一方面有利于促进黏粒和微团聚体形成土壤大团聚体, 有效改善了土壤物理性状, 增加了土壤有机碳储存空间<sup>[3]</sup>; 另一方面秸秆也会为微生物提供可利用养分, 使得微生物数量增加, 微生物在矿化土壤有机质中氮的同时释放了大量的碳, 从而提升土壤碳含量<sup>[30]</sup>。

据韩冰等<sup>[31]</sup>的研究表明我国当前秸秆还田现状下农田土壤固碳约  $23.89 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ , 而本研究结果表明在传统管理 (秸秆还田 15%)、秸秆还田 30%、50%和 90%下福建省水田土壤年均固碳速率分别为 0.31、0.54、0.86 和  $1.51 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ , 分别是我国当前秸秆还田率下固碳量的 1.31%、2.28%、3.61%和 6.33%。此外, 若对福建省水田土壤实施最大程度的 90%秸秆还田管理措施, 固碳潜力 ( $1.5 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 相当于逯非等<sup>[32]</sup>估算的我国稻田在全面推广秸秆还田固碳潜力 ( $10.48 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 的 14.31%, 是 Lal<sup>[33]</sup>估算实施推荐管理措施下中国农田土壤的固碳潜力 ( $25\sim37 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 的 4%~6%。

看, 传统管理措施下年均固碳速率 <150  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  面积集中分布在福建省的西北地区, 150~300  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的面积主要分布在福建省的东南部地区, 其余不同固碳速率范围内的水稻土零星分布在中部和南部地区 (图 5)。但是在不同秸秆还田量增加下全省水稻

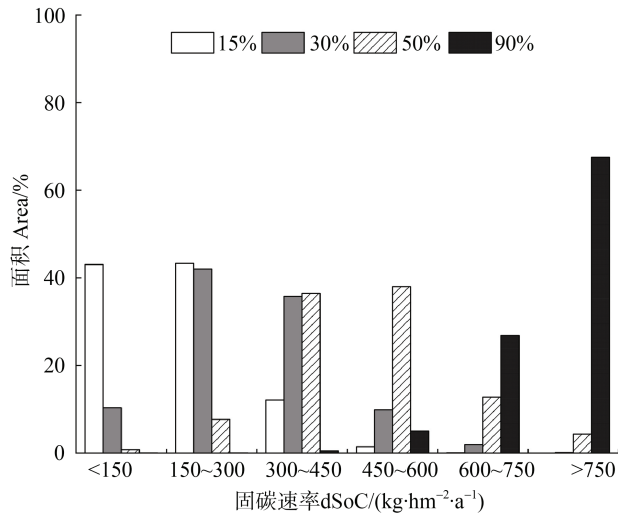


图4 不同秸秆还田率下福建省水田土壤各固碳速率的面积分布

Fig. 4 Area distribution of soil carbon sequestration rates in paddy fields under different straw returning rates in Fujian Province

土的固碳速率由西北向东南呈指数增加, 在秸秆还田率 30%下固碳速率主要分布在 150~450 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 秸秆还田率 50%下固碳速率主要分布在 300~600 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 而在秸秆还田率 90%下全省 70%的面积固碳速率>750 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 且均集中分布在东南部和内陆地区。

总体来看, 不同秸秆还田率下福建省水田土壤形成了西北内陆固碳速率低, 而东南沿海固碳速率高的分布格局, 这主要由于全省西北地区的水稻土黏粒含量较低, 而东南沿海地区的初始有机碳含量较低造成的<sup>[34]</sup>。从图 6 可以看出, 初始土壤有机碳、容重和黏粒是影响福建省水田土壤年均固碳速率的重要影响因子 (VIP>1), 初始土壤有机碳含量与年均固碳速率呈负相关, 而容重和黏粒与年均固碳速率呈正相关。进一步通过逐步回归分析得到, 不同秸秆还田率下初始有机碳和黏粒含量对土壤固碳速

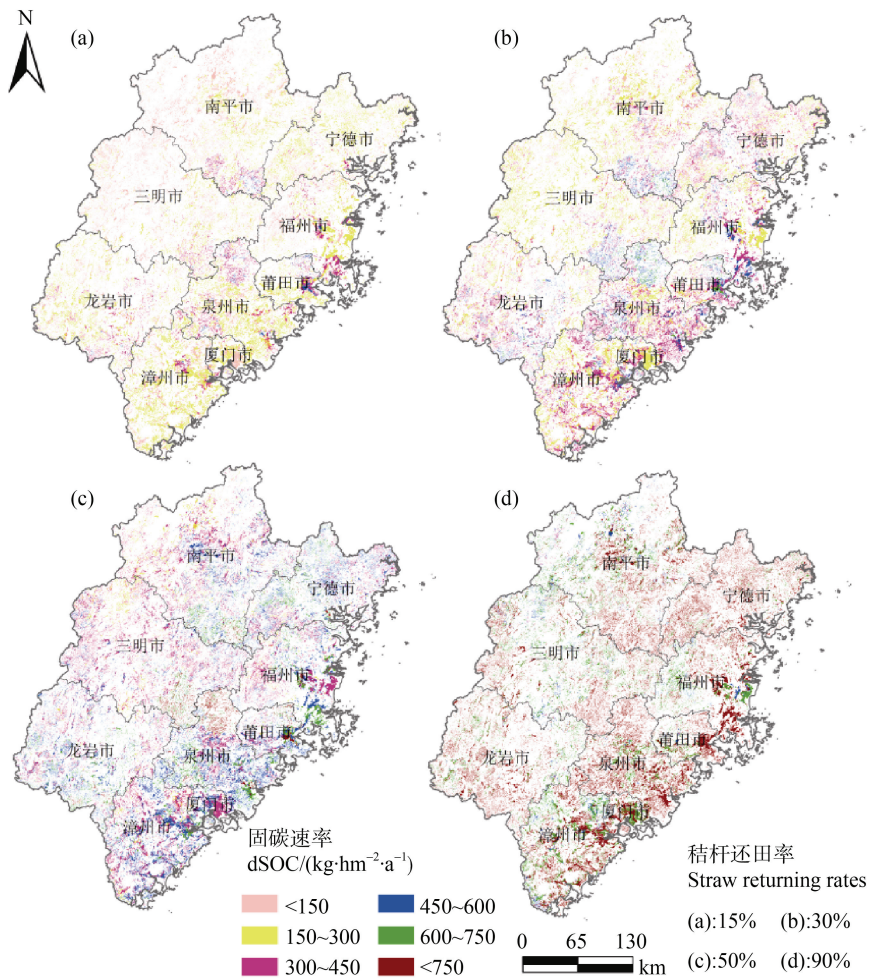
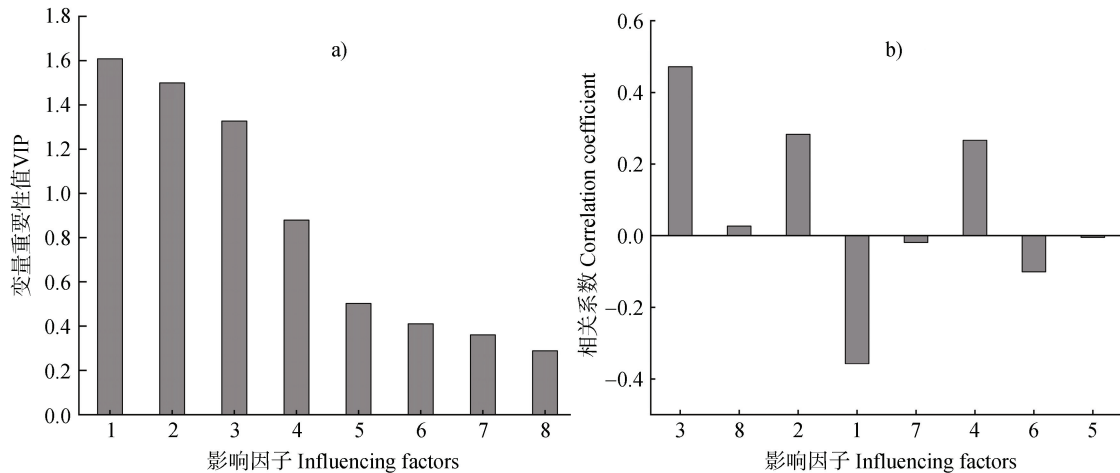


图5 不同秸秆还田率下 2017—2053 年福建省水田土壤年均固碳速率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual average carbon sequestration rate under different straw returning rates in Fujian Province from 2017 to 2053



注 Note: 1: 有机碳 Initial SOC; 2: 容重 Bulk density; 3: 黏粒 Clay; 4: 有机肥 Manure; 5: 降雨 Precipitation; 6: 温度 Temperature; 7: 氮肥 N-fertilizer; 8: pH

图 6 重要影响因子对年均土壤有机碳变化的变量投影重要性 VIP (a) 和相关系数 (b)

Fig. 6 Variable Projection Importance (VIP) (a) and Regression Coefficient (R) (b) of important influencing factors on the change of annual average soil organic carbon

率的解释度分别达到 18.8%~38.3%和 21.7%~30.5%之间,这主要是因为前者含量越高,土壤越接近碳饱和水平,这也会导致在后期的秸秆等外源碳加入下土壤固碳速率降低;而后者有利于形成土壤有机-无机复合体,从而有利于土壤固碳<sup>[35-37]</sup>。此外,福建省是由中、西两列大山带构成的,地形抬升使得中部和西部地区温度较低,降水量较大;而东部及东南沿海地区受副热带高压的影响,温度较高,降雨量较小<sup>[17]</sup>。根据偏相关分析可以得出,不同秸秆还田率下温度和降雨对年均固碳速率的解释介于 8.4%~49%,且随着秸秆还田率的增大,温度对年均固碳速率的解释高于降雨。很多研究表明,土壤中有有机碳的分解速率与年均降水量呈正比,而与年均温呈反比,与本研究的结果相一致,主要的原因是降雨量的增大会提高土壤含水量,进而降低土壤孔隙度,这会导致氧气传输受阻而影响微生物的活性,不利于有机碳的分解,而温度的升高反而会增强微生物活性使得土壤中的有机碳被快速分解<sup>[38]</sup>。

### 2.3 不同秸秆还田率下福建省水稻土亚类的碳汇贡献

不同秸秆还田率下 2017—2053 年福建省水田土壤各亚类均呈现“碳汇”效应(图 7)。其中,咸酸水稻土和盐渍水稻土在 4 种秸秆还田处理下年均固碳速率均最高,介于 220~920 kg·hm<sup>-2</sup>之间,这主要由于二者的黏粒含量均高于全省平均水平,分

别达到 29%和 18%(表 1)。逐步回归分析表明黏粒含量对福建省盐渍水稻土年均固碳速率的解释度高达 33.7%~52.8%,高的黏粒有利于形成土壤有机-无机复合体,从而增加了土壤的碳积累<sup>[39]</sup>。此外,福建省盐渍水稻土的初始有机碳含量也较低,为 13.26 g·kg<sup>-1</sup>,而年均有机肥施用量却较高,达到 47 kg·hm<sup>-2</sup>(以 N 计)。偏最小二乘回归分析表明(图 6),有机肥也是影响福建省水田土壤年均固碳速率的重要因子,很多研究表明,有机肥的施用可迅速提高土壤碳含量,且效应持久<sup>[40]</sup>。相对而言,潜育水稻土和淹育水稻土在 4 种秸秆还田率下的年均固碳速率较低,介于 140~842 kg·hm<sup>-2</sup>之间,前者主要分布在冲积平原的低洼地区,土体经常处于水饱和状态,有机质在嫌气状态下分解速率较为缓慢,导致该亚类的初始土壤有机碳含量高于全省平均水平,这也导致未来的农业管理中易分解有机碳;后者主要分布于沿海丘陵台地,土壤的黏粒含量远低于全省平均水平,仅为 9%,低的黏粒含量也不利于未来农业管理中的土壤固碳。其他土壤亚类在不同秸秆还田率下的年均固碳速率均低于全省平均水平,介于 158~857 kg·hm<sup>-2</sup>之间;其中,渗育水稻土多分布在沿海台地、丘陵山区及河谷两侧,潜育水稻土多分布于平原和盆地等交通便利的地区,二者土壤熟化程度均较高,耕作历史悠久,农业投入量大,年均氮肥均超过 280 kg·hm<sup>-2</sup>(以 N 计),导



表 1 福建省整个地区、各个水稻土亚类及行政单元的初始土壤属性、气候因子和施肥量

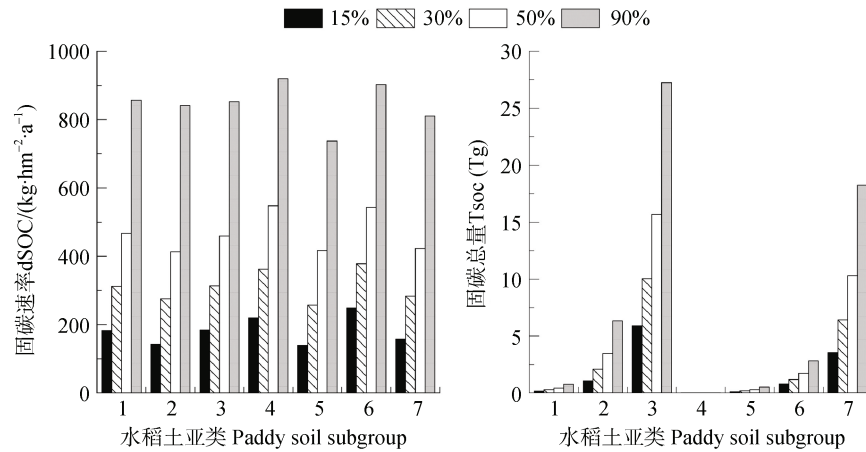
Table 1 Distribution of initial soil properties, climate factors and fertilizer application rates for the whole region, different subgroups and administrative units

	初始有机碳 Initial SOC/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	黏粒 Clay/ %	pH	容重 Bulk density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	年均降雨量 Annual mean precipitation/mm	年均温 Annual mean temperature/ ( $^{\circ}\text{C}$ )	氮肥 N-fertilizer/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , N)	有机肥 Manure / ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , N)
福建省 Fujian Province	15.72	17	5.2	1.28	1 596	20.3	285	40
水稻土亚类 Paddy soil subgroup								
漂洗水稻土 Bleached paddy soils	14.58	17	5.2	1.30	1 626	20.1	288	40
潜育水稻土 Gleyed paddy soils	16.77	18	5.1	1.27	1 668	19.7	272	34
渗育水稻土 Percogenic paddy soils	15.56	18	5.2	1.28	1-600	20.2	285	41
咸酸水稻土 Acid sulfate paddy soils	16.84	29	5.1	1.24	1 270	21.7	293	38
淹育水稻土 Submergenic paddy soils	12.21	9	5.0	1.33	1 399	21.9	284	54
盐渍水稻土 Salinized paddy soils	13.26	18	5.8	1.33	1 414	21.0	324	47
潜育水稻土 Hydromorphic paddy soils	16.09	16	5.3	1.27	1 596	20.4	284	39
行政区 Administrative area								
福州 Fuzhou	15.09	16	5.5	1.29	1 456	21.6	320	47
龙岩 Longyan	17.48	16	5.1	1.25	1 648	20.9	259	56
南平 Nanping	16.71	17	5.0	1.27	1 758	19.3	252	22
宁德 Ningde	15.36	18	5.3	1.29	1 719	17.6	246	25
莆田 Putian	13.18	17	5.6	1.33	1 543	21.9	445	56
泉州 Quanzhou	14.56	20	5.2	1.30	1 504	20.7	281	60
三明 Sanming	17.30	16	5.0	1.25	1 681	19.2	292	27
厦门 Xiamen	15.14	16	4.8	1.28	1 326	22.0	280	56
漳州 Zhangzhou	14.33	18	5.4	1.30	1 470	22.0	295	39

致初始有机碳含量均高于  $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，不利于后期固碳，而漂洗水稻土的黏粒含量相对其他水稻土亚类较低，为 17%，也不利于固碳<sup>[41-42]</sup>。

从固碳速率变化来看（图 7），不同秸秆处理下福建省各水稻土亚类的固碳能力差异很大。其中，潜育水稻土和淹育水稻土在不同秸秆处理下的固碳速率增幅最大，分别介于 94%~490%和 84%~428%

之间。很多研究表明，土壤中的碳积累存在一个最大饱和容量，初始有机碳含量越高，其后期固碳速率越小，该土壤更易接近碳饱和水平<sup>[43]</sup>。潜育水稻土虽然初始有机碳含量在所有亚类中基本是最高的，达到  $16.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，理论增幅较小，但由于该亚类常年处于淹水状态，有机物质在嫌气状态下分解速率缓慢，所以在外源秸秆加入下，固碳能力更大。



注 Note: 1: 漂洗型水稻土 Bleached paddy soils; 2: 潜育型水稻土 Gleyed paddy soils; 3: 渗育型水稻土 Percogenic paddy soils; 4: 咸酸型水稻土 Acid sulfate paddy soils; 5: 淹育型水稻土 Submergenic paddy soils; 6: 盐渍型水稻土 Salinized paddy soils; 7: 潜育型水稻土 Hydromorphic paddy soils

图 7 不同秸秆还田率下水稻土亚类的固碳速率和固碳总量

Fig. 7 Carbon sequestration rates ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) and total carbon sequestration (Tg) of paddy soil subgroups under different straw returning rates

淹育水稻土由于初始有机碳含量低于其他亚类，为  $12.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，故在外源秸秆加入下，固碳能力也较大。相对而言，咸酸水稻土和盐渍水稻土在不同秸秆还田处理下的固碳速率增幅最低，分别介于  $65\%\sim 319\%$  和  $52\%\sim 262\%$  之间，这主要由于二者的黏粒含量均较高，分别达到  $29\%$  和  $18\%$ 。土壤的黏粒会影响外源有机物质及其转化产物的分解速率，通常情况下，土壤中有机碳的蓄积量与黏粒含量呈正比，所以高的秸秆还田量和黏粒含量双重影响下这两个亚类土壤有机碳更易接近碳饱和水平，固碳能力较小。

从福建省不同水稻土亚类的“碳汇”贡献来看（图 7），咸酸水稻土和盐渍水稻土虽然是全省固碳速率最高的两个亚类，但因两者总面积仅为  $8.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，仅占研究区水稻土总面积的  $4.69\%$ ，导致这两个亚类在 4 种秸秆还田率下的固碳总量较小，合计约占研究区总固碳量的  $6\%$ 。相对而言，渗育水稻土和潜育水稻土虽然在不同秸秆还田率下固碳速率低于咸酸水稻土和盐渍水稻土，但因两者总面积高达  $147.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占研究区总面积的  $81.66\%$ ，4 种处理下的固碳总量合计介于  $9.45\sim 45.52 \text{ Tg}$  之间，约占研究区总固碳量的  $81\%$ 。此外，漂洗水稻土尽管固碳速率也较高，但因其面积仅为  $2.40 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，不同秸秆还田率下对全省的“碳汇”贡献率约为  $1.3\%$ ；而潜育水稻土和淹育水稻土不仅

固碳速率较低，而且两者总面积仅为  $22.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，不同秸秆还田率下对全省的“碳汇”贡献率约为  $11\%$ 。总体来看，福建省水稻土的固碳总量受固碳速率和分布面积大小共同控制。因此，在今后的全省农业碳中和管理中应重点考虑渗育水稻土和潜育水稻土亚类土壤的秸秆还田措施实施，以有效增加土壤“碳汇”是非常重要的。

#### 2.4 不同秸秆还田率下福建省各行政区水稻土的碳汇贡献

福建省不同地级市水稻土在各个秸秆还田率处理下的固碳速率和总量差异也很大（表 2）。其中，龙岩、泉州和莆田 3 个地级市在 4 种秸秆还田处理下年均固碳速率均较大，介于  $202\sim 937 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间。从表 1 可以进一步看出，龙岩、泉州和莆田 3 个地级市的农业投入也很大，年均有机肥施用量均超过  $55 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，远高于全省平均水平（ $40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）；此外，龙岩市由于背靠武夷山脉，年均温较低（ $20.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ），而年均降雨量较大（ $1648 \text{ mm}$ ），低温多雨的条件也有利于固碳。相对而言，南平和三明 2 个地级市在 4 种秸秆还田处理下的年均固碳速率均较小，介于  $110\sim 811 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间，这主要是由于二者初始有机碳含量分别达到  $16.71$  和  $17.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均高于全省平均水平（ $15.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），而年均有机肥施用量分别为  $22$  和  $27 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，远低于全省平均水平（ $40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ），不利于土壤固碳。

表 2 不同秸秆还田率下各地级市水田土壤的固碳速率和固碳总量

Table 2 Carbon sequestration rates ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ) and total carbon sequestration (Tg) of paddy soil in each prefecture-level city under different straw returning rates

行政区 Administrative area / ( $10^4 \text{hm}^2$ )	面积 Area	秸秆还田率 Straw returning rates							
		15% (传统管理)		30%		50%		90%	
		速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount	速率 dSOC	总量 Total amount
福州 Fuzhou	19.06	196	1.38	320	2.26	490	3.45	832	5.87
龙岩 Longyan	20.72	202	1.55	327	2.51	497	3.81	839	6.43
南平 Nanping	30.70	116	1.32	243	2.76	419	4.76	786	8.92
宁德 Ningde	17.24	162	1.03	304	1.94	504	3.22	928	5.92
莆田 Putian	7.32	267	0.72	391	1.06	557	1.51	888	2.41
泉州 Quanzhou	24.04	246	2.18	382	3.39	565	5.02	937	8.34
三明 Sanming	26.38	110	1.08	243	2.37	426	4.16	811	7.91
厦门 Xiamen	5.26	172	0.33	297	0.58	466	0.91	803	1.56
漳州 Zhangzhou	29.68	179	1.96	299	3.29	460	5.06	783	8.60

从表 2 可以看出, 福州、漳州、宁德 3 个地级市和厦门 1 个副省级市的水稻土在 4 种秸秆还田处理下年均固碳速率也相对较小, 介于  $162 \sim 928 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间。其中, 福州市、漳州市和厦门市地处沿海地区, 属于亚热带海洋性季风气候, 年均温高于全省平均温度 ( $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 而年均降雨量低于全省平均水平 ( $1596 \text{ mm}$ ), 高温少雨的气候条件加速了土壤中有机碳的矿化<sup>[44]</sup>; 而宁德市对农业重视度相对较低, 年均氮肥和有机肥施用量分别仅为  $246$  和  $25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 低于全省平均水平 ( $285$  和  $40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 也不利于土壤固碳 (表 1)。

从 4 种秸秆还田率处理下福建省不同行政区水稻土固碳速率变化来看 (表 2), 由于受土壤属性、气候和施肥等不同, 各行政区固碳能力差异很大。其中, 宁德市水稻土尽管在传统管理下的固碳速率较低, 但随着秸秆还田率的增加, 年均固碳速率提升很快, 当秸秆还田 90% 时年均固碳速率在全省 9 个地级市中排第 2, 单位面积固碳能力最大, 这主要是因为该市的年均降雨量很高, 达到  $1719 \text{ mm}$ , 而年均温度却是所有地级市中最底的, 仅为  $17.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 较高的降雨量和较低的温度均不利于土壤有机碳的分解, 使得外源有机质加入时土壤快速固碳。从 4 种秸秆还田处理下福建省不同行政区水稻土固碳总

量变化来看 (表 2), 南平和三明 2 个地级市在各个处理下的固碳总量增幅最大, 分别介于  $109\% \sim 578\%$  和  $120\% \sim 636\%$ , 主要原因是这两市年均有机肥施入量在所有地级市中最小, 分别为  $22 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $27 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 有利于后期秸秆还田下激发固碳效应<sup>[45]</sup>。

从表 2 可以看出, 不同秸秆还田率下福建省各行政区水稻土的“碳汇”贡献受面积和固碳速率共同控制。其中, 龙岩、泉州和漳州 3 个地级市在 4 种秸秆还田处理下对全省水稻土的“碳汇”贡献最大, 固碳总量合计约占全省的 45%。龙岩、泉州 2 个地级市的水稻土面积合计  $44.75 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占全省水稻土总面积的 24.8%, 固碳速率分别在  $202 \sim 839 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $246 \sim 937 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间, 较大的面积和较高的固碳速率导致这两个地级市的固碳总量合计介于  $3.73 \sim 14.76 \text{ Tg}$  之间, 约占全省水稻土固碳总量的 29%。漳州市虽然年均固碳速率相对较低, 但水稻土面积占全省总面积的 16.45%, 导致其固碳总量也相对较大, 不同秸秆还田处理下介于  $1.96 \sim 8.60 \text{ Tg}$  之间, 约占全省水稻土固碳总量的 16%。此外, 南平和三明 2 个地级市虽然年均固碳速率较低, 但其水稻土面积在全省分布也较广, 二者合计占全省水稻土总面积的 32%, 不同秸秆还田处理下的固碳总量合计介于  $2.39 \sim 16.84 \text{ Tg}$  之间,

约占全省水稻土固碳总量的 26%。其他行政区水稻土在不同秸秆还田处理下的固碳总量均较小，合计介于 3.47~15.75 Tg 之间，约占全省固碳总量的 28%。

## 2.5 不确定性分析

本研究尽管使用了目前福建省最详细的 1:5 万大比例尺土壤数据库和 15 000 多个实测样点数据对不同秸秆还田率下的水稻土固碳速率及总量进行了估算，但由于目前可获取数据的局限性，模拟结果主要存在以下 3 个方面的不确定性：第一，本研究虽然采用改进的、能充分体现成土过程和土壤属性空间异质性的土壤图“图斑”代替常用“县”为最小模拟单元的 DNDC 模型模拟，但由于逐年氮肥和有机肥施用量等农业资料均以目前区域尺度可获取、最详细的“县”为控制单元，一定程度上忽略了“县内”的空间异质性。第二，本次研究采用 1980—2016 年气象数据代替未来 2017—2053 年进行模型驱动，但由于未来气候变化的复杂性，未考虑极端气候事件等对土壤固碳的影响。第三，随着福建省经济的快速发展，2017—2053 年全省土地利用方式变化势必引起水稻土面积再分布，但由于未来土地利用方式的转换存在很大不确定性，本研究未考虑其对土壤固碳的影响，也会一定程度上增加模拟结果的误差。因此，今后需注重收集多期土地利用遥感数据，对农业管理数据库进行完善，以提高模型预测的准确度。

## 3 结 论

本研究利用福建省目前详细的 1:5 万大比例尺土壤数据库和农业生态广泛使用的 DNDC 模型，模拟了不同秸秆还田率下全省水稻土未来的有机碳动态变化。结果表明，2017—2053 年传统管理（秸秆还田 15%）、秸秆还田 30%、50% 和 90% 下全省水稻土的年均固碳速率分别为 173、302、478 和 838 kg·hm<sup>-2</sup>，固碳总量分别为 11.56、20.15、31.90 和 55.95 Tg。不同水稻土亚类中，渗育和潜育水稻土对全省水田的“碳汇”贡献最大，超过 80%。从不同行政区来看，全省水稻土约 45% 的“碳汇”贡献来源于龙岩、泉州和漳州 3 个地级市。本研究结果较好地反映了土壤属性、肥料、气候因子等综合作用下的福建省各地级市和不同土壤类型固碳潜力差异性，尤其土壤有机碳含量越低而黏粒含量越高

的情况下固碳速率越高；此外，本研究中秸秆还田率增加至 90% 下土壤固碳量仍在持续增加，这主要与该省的土壤有机质本底值相对较低有关。总体而言，秸秆还田比率提升对福建省水田土壤的“碳汇”贡献很大，但不同秸秆还田率下各个水稻土亚类和行政区受土壤属性、气候和施肥等的影响，固碳能力差异很大，今后应针对性制定不同土壤类型和行政单元的“碳中和”农业管理措施。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] IPCC. Climate change 2021-The physical science basis[J]. Chemistry International, 2021, 43 ( 4 ): 22—23.
- [ 2 ] Ma L J, Kong F X, Lü X B, et al. Responses of greenhouse gas emissions to different straw management methods with the same amount of carbon input in cotton field[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105126.
- [ 3 ] Dong J X, Cong P, Liu N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 ( 4 ): 921—934. [董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 ( 4 ): 921—934.]
- [ 4 ] Long J, Mao Y L, Zhang L M, et al. Advances of soil organic carbon model in farmland ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28 ( 5 ): 232—239. [龙军, 毛艳玲, 张黎明, 等. 农田土壤有机碳演变模型的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28 ( 5 ): 232—239.]
- [ 5 ] Tang H J, Qiu J J, van Ranst E, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model[J]. Geoderma, 2006, 134( 1/2 ): 200—206.
- [ 6 ] Zhang F, Wang Z, Glidden S, et al. Changes in the soil organic carbon balance on China's cropland during the last two decades of the 20th century[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7144.
- [ 7 ] Chen J H, Wang S Q, Florian K, et al. Spatial analysis of the soil carbon sequestration potential of crop-residue return in China based on model simulation[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10 ( 2 ): 184.
- [ 8 ] Deng X Z, Han J Z, Wang X B, et al. Effect of no-tillage and crop residue return on soil organic carbon dynamics of cropland in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010 ( 6 ): 22—28. [邓祥征, 韩健智, 王小彬, 等. 免耕与秸秆还田对中国农田土壤有机碳贮量变化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010 ( 6 ): 22—28.]
- [ 9 ] Liu Q, Sun B, Xie X L, et al. The spatial-temporal dynamic change and simulation of County-scale paddy soil organic carbon in red soil hilly region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 ( 6 ): 1059—1067. [刘清,

- 孙波, 解宪丽, 等. 县域尺度红壤丘陵区水稻土有机碳模拟[J]. 土壤学报, 2009, 46 (6): 1059—1067.]
- [ 10 ] Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Simulation of carbon sequestration potential from paddy fields in Jiangsu Province under different tillage practices[J]. *Soils*, 2012, 44 (2): 253—259. [徐胜祥, 史学正, 赵永存, 等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. 土壤, 2012, 44 (2): 253—259.]
- [ 11 ] Lin F Y, Wu Y J, Wang S Q, et al. Simulation and prediction of straw return on soil carbon sequestration potential of cropland in Jiangxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28 (6): 981—993. [林飞燕, 吴宜进, 王绍强, 等. 秸秆还田对江西农田土壤固碳影响的模拟分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28 (6): 981—993.]
- [ 12 ] Zhang L M, Yu D S, Shi X Z, et al. Effects of soil data and simulation unit resolution on quantifying changes of soil organic carbon at regional scale with a biogeochemical process model[J]. *PLoS One*, 2014, 9 (2): e88622.
- [ 13 ] Zhang L M, Yu D S, Shi X Z, et al. Simulation of methane emissions from rice fields in the Taihu Lake region, China by using different unit of soil database with the DNDC model[J]. *Environmental Science*, 2009, 30 (8): 2185—2192. [张黎明, 于东升, 史学正, 等. 基于不同土壤数据单元法的 DNDC 模型对太湖地区水稻土 CH<sub>4</sub> 排放模拟研究[J]. 环境科学, 2009, 30 (8): 2185—2192.]
- [ 14 ] Chen Y F, Xia X G, Yang L, et al. Straw return is the realistic way of straw resource utilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020 (6): 299—307. [陈云峰, 夏贤格, 杨利, 等. 秸秆还田是秸秆资源化利用的现实途径[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 299—307.]
- [ 15 ] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20 (4): 345—350. [李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20 (4): 345—350.]
- [ 16 ] Huang G Q, Li W H. Environmental pollution of agriculture in mid-subtropical regions in China[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2006, 18 (5): 145—150. [黄国勤, 李文华. 中国中亚热带地区的农业环境污染[J]. 江西农业学报, 2006, 18 (5): 145—150.]
- [ 17 ] Jiao S S, Zhang L M, Jiang W, et al. Analysis of dynamics of deposit of total nitrogen in farmland of Fujian Province based on 1 : 50 000 soil database[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1107—1119. [焦闪闪, 张黎明, 蒋威, 等. 基于 1 : 5 万土壤数据库的福建省耕地全氮储量动态变化研究[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1107—1119.]
- [ 18 ] Long J, Zhang L M, Mao Y L, et al. Study on the difference of contributions made by various cropland soil and land use types to carbon source/sink in Fujian Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4): 664—674. [龙军, 张黎明, 毛艳玲, 等. 福建省不同耕地土壤和土地利用类型对“碳源/汇”的贡献差异研究[J]. 土壤学报, 2013, 50 (4): 664—674.]
- [ 19 ] Li C S. Modeling terrestrial ecosystems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1 (1): 49—57. [李长生. 陆地生态系统的模型模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1 (1): 49—57.]
- [ 20 ] Hastings A F, Wattenbach M, Eugster W, et al. Uncertainty propagation in soil greenhouse gas emission models: An experiment using the DNDC model and at the Oensingen cropland site[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136 (1/2): 97—110.
- [ 21 ] Syp A, Faber A, Walker M B. Simulation of soil organic carbon in long-term experiments in Poland using the DNDC model[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, 10 (3/4): 1224—1229.
- [ 22 ] Xie H K, Jiang Y Q, Li H, et al. Modification and application of the DNDC model in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (8): 2760—2770. [谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (8): 2760—2770.]
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, et al. Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (1): 78—83.
- [ 25 ] Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Carbon sequestration potential of recommended management practices for paddy soils of China, 1980-2050[J]. *Geoderma*, 2011, 166 (1): 206—213.
- [ 26 ] Zhang L M, Wang G X, Zheng Q F, et al. Quantifying the impacts of agricultural management and climate change on soil organic carbon changes in the uplands of Eastern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 81—91.
- [ 27 ] Chen Z, Wang J, Deng N R, et al. Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock at a County-regional scale[J]. *Catena*, 2018, 160: 76—89.
- [ 28 ] Zhang Y J, Niu H S. The development of the DNDC plant growth sub-model and the application of DNDC in agriculture: A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 230: 271—282.
- [ 29 ] Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black

- soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (22): 4613—4622. [高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (22): 4613—4622.]
- [ 30 ] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (6): 1381—1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1381—1392.]
- [ 31 ] Han B, Wang X K, Lu F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (2): 612—619. [韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28 (2): 612—619.]
- [ 32 ] Lu F, Wang X K, Han B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (1): 99—108. [逯非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (1): 99—108.]
- [ 33 ] Lal R. Offsetting China's CO<sub>2</sub>Emissions by soil carbon sequestration[J]. *Climatic Change*, 2004, 65 (3): 263—275.
- [ 34 ] 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. [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.]
- [ 35 ] Wang G C, Li T T, Zhang W, et al. Impacts of agricultural management and climate change on future soil organic carbon dynamics in North China plain[J]. *PLoS One*, 2014, 9 (4): e94827.
- [ 36 ] Wang G X, Zhang L M, Zhuang Q L, et al. Quantification of the soil organic carbon balance in the Tai-Lake paddy soils of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 95—106.
- [ 37 ] McConkey B G, Liang B C, Campbell C A, et al. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 74 (1): 81—90.
- [ 38 ] Mondini C, Coleman K, Whitmore A P. Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001-2100: Potential for compost amendment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 153: 24—32.
- [ 39 ] Wu S R, Wei J, Qiu L X, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of farmland soil in Fujian Province based on the large scale soil database[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (5): 1293—1305. [吴世蓉, 位佳, 邱龙霞, 等. 基于大比例尺数据库的福建省耕地土壤固碳速率和潜力研究[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (5): 1293—1305]
- [ 40 ] Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26 (2): 278—285. [姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2007, 26 (2): 278—285.]
- [ 41 ] Zhao G, Bryan B A, King D, et al. Impact of agricultural management practices on soil organic carbon: Simulation of Australian wheat systems[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19 (5): 1585—1597.
- [ 42 ] Wang G X, Zhang L M, Li X D, et al. Study of soil organic carbon sequestration rate and potential of upland in northern Jiangsu Province based on high-resolution soil database[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25 (3): 422—431. [王光翔, 张黎明, 李晓迪, 等. 基于高精度土壤数据库的苏北旱地固碳速率和潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25 (3): 422—431.]
- [ 43 ] Qin X B, Wang H, Li Y E, et al. A long-term sensitivity analysis of the denitrification and decomposition model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 43: 26—36.
- [ 44 ] Zhang L M, Zhuang Q L, Li X D, et al. Carbon sequestration in the uplands of Eastern China: An analysis with high-resolution model simulations[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 165—176.
- [ 45 ] Wang L G, Li H, Qiu J J, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 29—37. [王立刚, 李虎, 邱建军, 等. 田间管理措施对土壤有机碳含量影响的模拟研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2010 (6): 29—37.]

(责任编辑: 檀满枝)