

DOI: 10.11766/trxb202012040671

吴世蓉, 位佳, 邱龙霞, 陈瀚阅, 范协裕, 毋亭, 邢世和, 张黎明. 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.

WU Shirong, WEI Jia, QIU Longxia, CHEN Hanyue, FAN Xieyu, WU Ting, XING Shihe, ZHANG Liming. 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.

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*

吴世蓉^{1, 2}, 位佳^{1, 2}, 邱龙霞^{1, 2}, 陈瀚阅^{1, 2}, 范协裕^{1, 2}, 毋亭^{1, 2}, 邢世和^{1, 2}, 张黎明^{1, 2†}

(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)

摘 要: 明确土壤固碳速率和潜力是制定耕地固碳减排措施的基础。以我国典型亚热带地区—福建省不同地理位置的闽侯、浦城、同安、武平和永定 5 个县为研究区, 运用生物地球化学过程模型 DNDC (DeNitrification and Decomposition), 模拟这 5 个县在目前区域尺度最详细的 1: 5 万土壤数据库下 1980—2009 年和 2010—2039 年有机碳动态变化, 并运用尺度上推的方法估算出全省耕地土壤固碳速率和潜力。结果表明, 福建省耕地土壤 1980—2009 年的固碳总量为 7.37 Tg, 而 2010—2039 年的固碳潜力为 7.04 Tg, 两个时段的年均固碳速率分别为: 190 kg·hm⁻² 和 176 kg·hm⁻², 说明目前的农田管理措施有利于研究区长期固碳。其中, 水稻土和盐渍水稻土分别在土类和亚类级别中固碳速率最大, 不同时段均大于 175 kg·hm⁻²·a⁻¹; 而红壤在土类和亚类级别中固碳速率皆最小, 不同时段均小于 3 kg·hm⁻²·a⁻¹。总体来看, 1980—2009 年和 2010—2039 年水稻土的固碳总量均占全省耕地固碳总量的 92% 以上, 是今后制定固碳减排措施的重点。

关键词: 大比例尺土壤数据库; 土壤有机碳; DNDC 模型; 固碳速率; 固碳潜力

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Study of Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Potential of Farmland Soil in Fujian Province Based on the Large Scale Soil Database

WU Shirong^{1, 2}, WEI Jia^{1, 2}, QIU Longxia^{1, 2}, CHEN Hanyue^{1, 2}, FAN Xieyu^{1, 2}, WU Ting^{1, 2}, XING Shihe^{1, 2}, ZHANG Liming^{1, 2†}

(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)

* 国家自然科学基金项目 (41971050)、福建省自然科学基金项目 (2019J01660) 和福建农林大学国际科技合作与交流项目 (KXGH17017) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971050), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2019J01660), and the Project of International Cooperation and Exchange of Fujian Agriculture and Forestry University (No. KXGH17017)。

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

作者简介: 吴世蓉 (1995—), 女, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮循环与 GIS 应用研究。E-mail:

WSRong1108@163.com 收稿日期: 2020-12-04; 收到修改稿日期: 2021-05-31; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-07-25

Abstract: 【Objective】Farmland soil organic carbon pool is one of the most important soil carbon pools and its sequestration and emission have a huge impact on global climate change. It is essential to estimate the soil carbon sequestration rate and potential of farmland soils accurately for managing soil fertility and the ecological environment. Fujian Province is characterized by a large population and small land use and strong spatial heterogeneity of soil. It is of great significance to identify the dynamic evolution trend of soil organic carbon and future carbon sequestration potential of cultivated land in this region for formulating the national strategy of "carbon neutrality" and food security in subtropical regions of China. 【Method】This study covered five counties including Minhou, Pucheng, Tongan, Wuping and Yongding, located in different geographical locations in Fujian Province. Soil attributes data based on the data of field measurements at 30, 211 sampling sites in 1980 and 15, 948 sampling sites in 2008, scattered in these five counties were analyzed. The 1980 soil spatial database was digitized during the Second Soil Survey 1: 50 000 soil map and the 2008 soil spatial database was extracted from the annual 1: 50 000 land-use status map. Through ArcGIS software and the Ordinary Kriging method, we related the soil spatial data and soil attributes to obtain a high-precision farmland soil database. Based on the most detailed soil database of 1: 50 000 at the regional scale, we used the biogeochemical process model DNDC(DeNitrification and Decomposition)to simulate the organic carbon changes in these five counties from 1980 to 2009 and to get predicted value from 2010 to 2039. Also, we estimated the soil carbon sequestration rate and potential of farmland soil in the province by the method of scaling up. 【Result】Results show that the carbon sequestration amount of the cultivated land in Fujian Province from 1980 to 2009 was 7.37 Tg, and the carbon sequestration potential from 2010 to 2039 was 7.04 Tg. The average annual carbon sequestration rate for the two periods was $190 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $176 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Among them, paddy soil and saline paddy soil showed the highest carbon sequestration rate in soil type and soil subgroup, respectively, and was greater than $175 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in different periods. The carbon sequestration rate of the red soil group and soil subgroup was the lowest, with an average rate between $-29\sim 3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Generally, the total carbon sequestration of paddy soil was higher than 6.5 Tg in different periods, accounting for more than 92% of the province's total carbon sequestration, which is the key to formulating carbon sequestration and emission reduction measures in the future.【Conclusion】Results of this study indicate that the cultivated soil in Fujian province showed a weak "carbon sink" effect from 1980 to 2009 and 2010 to 2039. This indicates that the current farmland management measures in this area are conducive for carbon sequestration of cultivated soil and should continue to be promoted. Meanwhile, due to the high variability in soil properties, the soil organic carbon(SOC)change in Fujian province was strongly influenced by soil type, soil subgroup and soil genus. Therefore, in future "carbon sink" policy formulation, it is necessary to formulate corresponding management measures for specific soil types.

Key words: Large scale soil database; Soil organic carbon; DNDC(Denitrification and decomposition)model; Carbon sequestration rate; Carbon sequestration potential

土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 作为全球碳库中最为活跃的部分, 其微小变化将会引起大气中二氧化碳 (CO_2) 浓度发生剧烈改变, 进而影响全球气候变化。据统计, 全球土壤有机碳总储量约为 $1\ 550 \text{ Pg}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), 是大气碳库的 2 倍, 植被碳库的 3 倍和生物碳库的 4 倍^[1-2]。与自然土壤相比, 农田土壤有机碳更容易受到强烈人为干扰并可在较短时间内调节^[3]。很多学者认为, 在当前 CO_2 排放日益加剧且还没找到有效替代技术的前提下, 土壤固碳是保持经济持续发展与缓解气候变化的“双赢”技术, 而明确耕地土壤目前的固碳速率和未来的固碳潜力是制定农业合理“固碳减排”国家战

略的首要基础^[4-5]。

陆地生态系统碳循环是一个极为复杂的过程, 气候、土壤、生物和人类活动等因素均会对土壤有机碳时空变化产生影响。为了描述和预测这一复杂系统过程, 应用综合多种影响因素的土壤有机碳模型不可避免地成为一种重要而被广泛接受的研究方法。目前, 国际上已开发出许多功能各异、能描述碳循环的模型, 如: Century, CANDY, DAISYS, DNDC, NCSOIL, RothC, Agro-C 和 SCNC 等。其中, Li 等^[6]根据中国和美国长期定位试验数据建立的 DNDC (DeNitrification and DeComposition) 模型由于运用氧化还原电位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，且以日步长模拟作物从播种到收获的全过程；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^[7]。此外，该模型也经过我国科学家的不断改进和扩充，可很好地适用于中国特有的农业生态系统，改进后的模型针对土壤有机碳变化、氮素流失和温室气体排放等方面进行了大量验证，并在点位和区域尺度上得到了广泛应用^[8-10]。如，Tang 等^[11]利用 1: 1 400 万土壤数据库和 DNDC 模型模拟发现我国农田土壤有机碳每年损失 78.89 Tg。Xu 等^[12-13]基于目前国家尺度最为详细的 1: 100 万土壤数据库，并结合 DNDC 模型模拟了 1980—2050 年我国水稻土的有机碳动态变化，结果表明该时段内的固碳总量达到 29.2~847.7 Tg。Zhang 等^[14]结合 DNDC 模型与 1: 1 400 万“县级”单元法研究发现太湖地区水稻土在 1982—2000 年间共释放 15.38 Tg C。Xu 等^[15]结合 1: 100 万土壤数据库与 DNDC 模型研究发现江苏省水稻土 1980 年和 2008 年有机碳储量分别为 201.6 Tg 和 216.2 Tg。Zhang 等^[16]结合 1: 1 400 万土壤数据库和 DNDC 模型模拟发现黄土高原的农田土壤有机碳储量为 1.15 Pg。Liu 等^[17]结合 1: 25 万土壤数据库与 DNDC 模型对华北平原曲周县不同耕作方式下土壤有机碳空间变化进行了研究。

但是从目前的研究来看，由于缺乏详细的土壤数据及建立该类数据库不易，大区域尺度上的 DNDC 模型有机碳研究多集中在中、小比例尺土壤数据库，而粗糙的土壤数据将在一定程度上降低模拟精度，从而增加了“固碳减排”管理措施制定的不确定性^[18]。福建省整个地区均属于亚热带，在地质构造运动及长期外营力的综合作用下该地区形成了复杂多变的地形地貌。据统计，在福建省丘陵山地占全省耕地总面积的 48%，谷地盆地和平原台地占全省耕地总面积的 52%；此外，该省的人均耕地不足 0.04 hm²，人多地少且利用强度大，导致土壤属性空间变异性强烈^[19-20]。因此，明确福建省耕地土壤有机碳的动态演变趋势和未来固碳潜力对于合理制定我国亚热带地区“碳中和”与粮食安全国家战略具有重要意义^[20]。但目前福建省域尺度的耕地土壤有机碳研究多集中于利用第二次土壤普查资料和多目标区域地球化学调查数据对碳储量的估算^[21-22]，以及定量评估不同制图比例尺土壤数

据库对碳储量估算的影响方面^[23]，而缺乏结合大比例尺土壤数据库和大样本实测数据的多期动态变化模拟研究，这一定程度上制约了基于过去的演变趋势和未来的固碳潜力制定适宜的农业管理措施。基于此，在目前建立覆盖全省耕地大比例尺土壤数据库和收集多期实测土壤样点数据困难的情况下，本研究选取福建省不同地理位置且土壤类型、气候条件均具代表性的闽侯、浦城、同安、武平和永定 5 个典型县耕地为研究区，运用农田生态系统中广泛使用的生物地球化学模型 DNDC (DeNitrification and DeComposition)，以充分体现土壤空间异质性的“图斑”为最小模拟单元，模拟这 5 个县在 1: 5 万大比例尺土壤数据库下 1980—2009 年和 2010—2039 年的有机碳动态变化，并通过尺度上推的方法估算出全省耕地土壤固碳速率和潜力，研究结果可为合理制定我国亚热带地区耕地固碳减排政策和改善土壤质量提供理论依据。

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°30′~28°22′N，115°50′~120°40′E 之间，辖一个副省级城市和 8 个地级市。全省属亚热带海洋性季风气候，以闽中山为界分为南亚热带和中亚热带气候。年均气温在 14.6~21.3℃之间，年均降水量在 1 000~2 100 mm 之间，雨水充沛，是我国多雨的地区之一。根据第二次土壤普查结果显示，福建省耕地总面积为 129.50 万 hm²，土壤类型分为水稻土、红壤、赤红壤、黄壤、紫色土、滨海盐土和潮土 7 大土类，其中水稻土占绝对优势，占耕地总面积的 82.63%^[24]。

本研究分别在福建省选取不同地理位置并涵盖全省所有气候带类型的 5 个县（浦城、闽侯、永定、同安、武平和）作为典型研究区，其中浦城县在全省最北端，属于中亚热带季风湿润气候区，隶属南平市；闽侯县和永定县均属于中亚和南亚热带过渡气候区，分别隶属于福州市和龙岩市；同安区地处闽南“金三角”，属于南亚热带海洋性季风气候，隶属厦门市；武平县位于闽、粤、赣三省交界处，属于中亚热带气候区，隶属龙岩市（图 1）。在农业种植方面，武平和永定县水光热资源搭配合理，农业

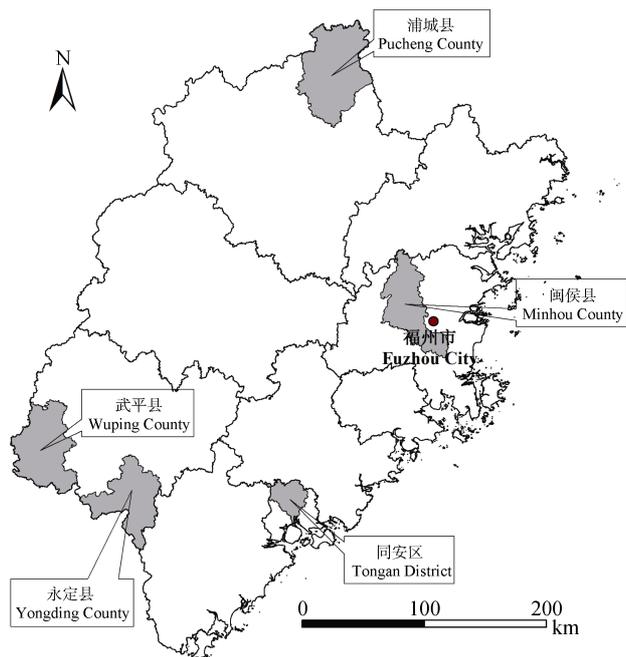


图1 福建省不同典型县地理位置分布

Fig. 1 Geographical location of the typical counties in Fujian Province

气候条件好, 烟草、双季稻等喜温作物种植较多; 同安区地处闽东南, 以种植喜温耐旱的双季稻为主; 浦城县小气候差异较明显, 以种植单季稻为主。可以看出, 5个典型县耕地主要种植双季稻和单季稻, 符合全省耕地80%多为水稻土的实际情况。此外, 5个县水稻土、红壤、赤红壤、黄壤、紫色土、滨海盐土和潮土面积分别占所有典型县耕地总面积的90.84%、4.10%、3.79%、0.90%、0.24%、0.07%和0.05%, 这与全省耕地土壤类型面积比例分布基本一致^[24]。同时本研究选择5个县的丘陵山地占所有典型县耕地总面积的50%, 谷地盆地和平原台地占所有典型县耕地总面积的50%, 也与全省的比例基本相一致, 这为以典型县(小尺度区域)为基础, 基于相似原理利用尺度上推的方法推演全省(大尺度区域)土壤有机碳变化提供了基础^[19, 25]。

1.2 DNDC 模型验证

虽然DNDC模型已被大量国内外学者用于农田土壤有机碳模拟, 且模拟结果可信度较高, 但将该模型用于估算福建省水稻土有机碳动态演变时, 有必要与大样本实测数据进行验证。若实测值与模拟值较符合, 则证明DNDC模型可用于福建省水稻土有机碳动态演变研究, 否则需要进一步调整模型参数。基于此, 本研究选择覆盖全省不同气候带的5

个典型县(浦城县位于中亚热带气候区, 同安区位于亚热带气候区, 永定县、武平县和闽侯县位于中亚亚热带过渡气候区)2008年农业农村部测土配方施肥10 064个水田土壤有机碳实测数据与模拟数据(0~15 cm)进行比较, 并使用决定系数(R^2)、平均绝对预测误差(MAE)和均方根预测误差(RMSE)^[18]3个性能指标对DNDC模拟结果进行验证。其中 R^2 值越大, 自变量对因变量的解释程度越高, 自变量引起的变动占总变动的百分比越高, 相应地模拟精度就越高。MAE反映了估计值的实测误差范围, 定量地给出误差; RMSE反映利用样点数据的估值灵敏度和极值效应; MAE和RMSE值越小预测结果越准确。

1.3 数据基础

本研究中的1:5万大比例尺土壤数据库包括福建省5个典型县(武平、闽侯、同安、永定和浦城)1980年和2008年土壤空间及属性数据库。其中, 1980年土壤空间数据库是第二次土壤普查1:50 000纸质土壤图经ArcGIS 10.0数字化建立的, 以中国土壤发生分类土属为基本单元, 共有25个土属、12个亚类和7个土类; 2008年土壤空间数据库由该年度带有土壤类型的1:50 000土地利用现状图中直接提取获得。由于5个典型县在1980—2008年间耕地面积发生了较大变化, 本研究利用ArcGIS中的“Intersect”命令将5个县土壤图与耕地利用类型图进行叠加, 并以两期图斑“交集”作为评价底图来保证评价对象的可比性^[26]。土壤属性数据分别来自1980年第二次土壤普查资料和2008年农业农村部测土配方施肥项目, 这两期的实测样点(0~15 cm)数据分别为30 211个和15 948个。利用普通克里格插值方法对不同时期样点数据进行插值, 并与5个典型县土壤空间数据库链接, 建立1980年和2008年两期大比例尺土壤类型-土地利用耕地土壤数据库。本研究采用Song等^[27]根据我国第二次土壤普查数据建立的土壤容重与有机碳含量的回归模型($Y=1.3770 \times e^{-0.0048 \times \text{SOC}}, R^2=0.787, P<0.001, n=4\ 765$, 式中SOC为有机碳含量)计算5个典型县土壤样点中缺失的容重数据。

模型运行所需的农业数据主要包括5个典型县农作物的种类、产量、种植制度、施肥、灌溉和农田管理措施, 以及家畜和农业人口数据等, 这部分

数据来自于 5 个典型县 1980—2009 年的农业统计年鉴^[13]。模型运行所需的气象数据（1980—2009 年的逐日最高最低气温和降水量等）主要来自于福建省福州、龙岩、浦城、上杭和厦门 5 个气象站。

1.4 统计方法与差异性分析

不同土壤类型面积加权平均有机碳固碳速率（dSOC, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ）和固碳总量（TSOC, Tg）的计算公式如下：

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

$$\text{AMSC} = \sum_{f=1}^h \text{ASC}_f \quad (2)$$

$$\text{TSOC} = \sum_{i=1}^n (\text{APS}_i \times \text{AMSC}_i) \quad (3)$$

$$\text{dSOC} = \text{TSOC} / \text{APS} / 30 \quad (4)$$

式中，APS 为研究区耕地土壤总面积（ hm^2 ）； APS_i 表示土壤数据库中每个耕地图斑面积， hm^2 ； ASC_f 表示每个图斑年平均有机碳变化量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ， AMSC_i 表示每个图斑年平均土壤有机碳 1980—2009 和 2010—2039 年总变化量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ； n 为图斑数， h 为模拟年份（ $h=1, 2, \dots, 30$ ）。

1.5 尺度上推

尺度上推是基于典型相似性原理，通过比例换算等技术手段将小尺度区域的土壤属性空间分布特征及变化规律推算至大尺度区域^[24]。本研究以位于福建省不同地理位置的闽侯、同安、浦城、永定、武平五个典型县为基础，依据相似原理和尺度上推的方法估算全省耕地土壤固碳速率及潜力。具体方法如下：以 5 个典型县土壤数据库及气候、作物、农田管理措施等资料为基础，模拟得出 1980—2009 年和 2010—2039 年每个县不同土壤类型和土地利用有机碳变化速率（dSOC）；然后根据 1980 年全省第二次土壤普查《福建土壤》记录的各农业土壤类型面积、比例以及 2007 年省国土厅公布的《国土资源综合分析报告》中的耕地利用类型面积数据，将 5 个典型县每个图斑的实体面积按照土壤类型和土地利用类型分别平差转换为 1980 年和 2008 年全省耕

地土壤面积，并结合这 5 个典型县 1980—2009 年过去的有机碳变化速率和 2010—2039 年未来的有机碳变化速率估算出全省不同耕地土壤类型的有机碳变化总量，从而实现福建省耕地土壤的固碳速率和潜力模拟^[25]。

2 结果与讨论

2.1 DNDC 模型精度

2008 年福建省 5 个典型县的实测样点土壤有机碳含量变化范围在 $0.86\sim 40.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，而 2008 年模拟的土壤有机碳含量变化范围在 $6.82\sim 32.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，全部样点土壤有机碳模拟值含量在实测值范围内，说明模拟结果与实测值之间有很高的一致性。进一步统计表明，5 个典型县土壤有机碳模拟结果和实测数据之间的决定系数（ R^2 ）达到 0.636（ $P<0.001$, $n=10604$ ），MAE 和 RMSE 也较小，分别为 $3.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，表明 DNDC 在研究区模拟精度较高，可以适用于福建省耕地土壤有机碳动态变化的模拟（图 2）。

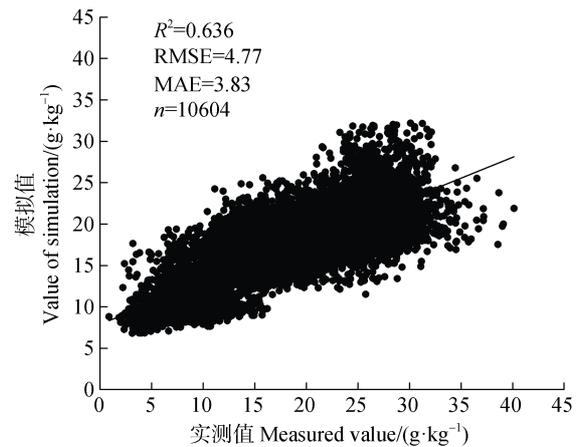
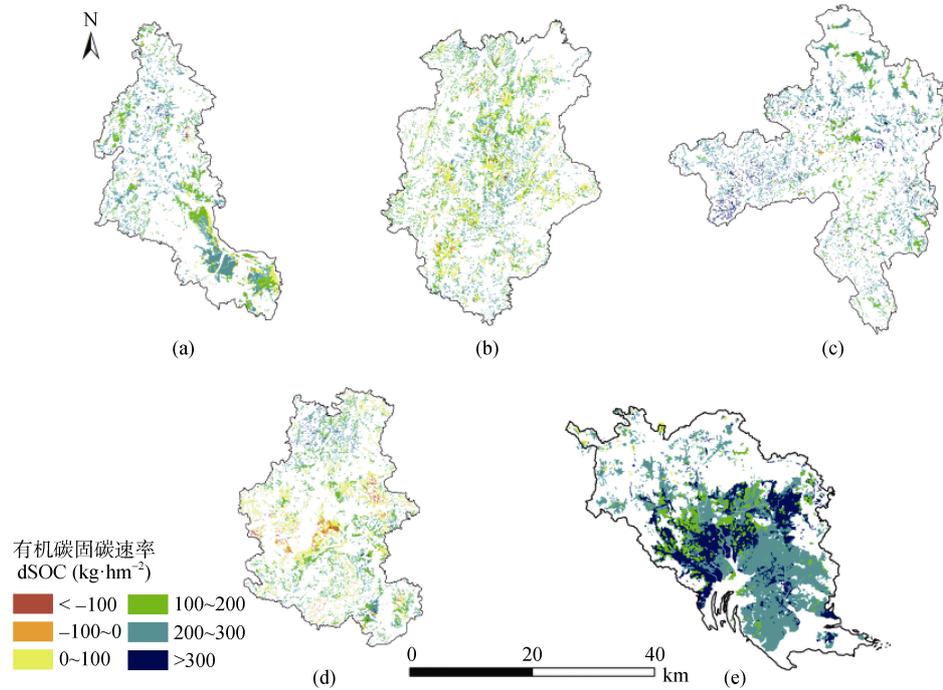


图 2 5 个典型县耕地土壤有机碳实测值与模拟值比较
Fig. 2 Comparison between simulated and observed SOC values from 1: 50 000 database of five typical counties

2.2 福建省耕地土壤固碳速率和潜力

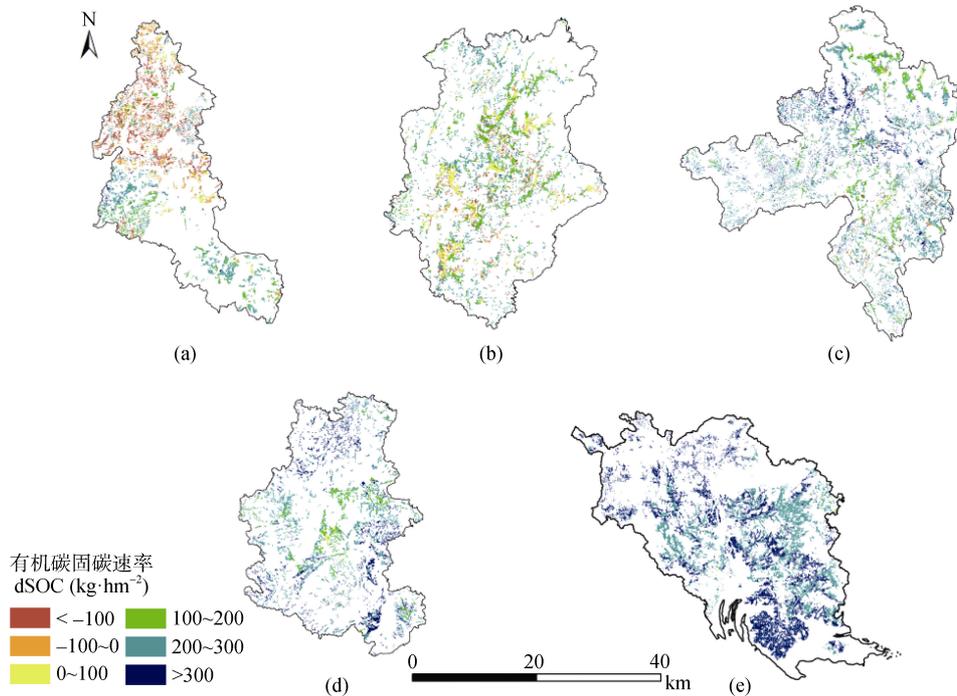
由图 3 和图 4 可以看出，福建省 5 个典型县耕地土壤有机碳变化速率空间分布差异很大。1980—2009 年耕地土壤有机碳变化速率最大值出现在同安区，达到 $1\ 047 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，而最小值出现在武平县，仅为 $-498 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，二者相差 4 倍多。



注：a 为闽侯，b 为浦城，c 为永定，d 为武平，e 为同安。Note: a: Minhou County, b: Pucheng County, c: Yongding County, d: Wuping County, e: Tongan District.

图 3 1980—2009 年不同典型县年均固碳速率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average annual SOC changes from 1980 to 2009 in typical counties



注：a 为闽侯，b 为浦城，c 为永定，d 为武平，e 为同安。Note: a: Minhou County, b: Pucheng County, c: Yongding County, d: Wuping County, e: Tongan District.

图 4 2010—2039 年不同典型县年均固碳速率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average annual SOC changes from 2010 to 2039 in typical counties

2010—2039 年耕地土壤有机碳变化速率最大值和最小值均出现在浦城县，分别为 $2\ 230\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-607\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，二者相差 5 倍多。以五个典型县为基础进一步尺度上推估算出全省耕地土壤 1980—2009 年平均固碳速率为 $190\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，30 年间固碳总量为 $7.37\ \text{Tg}$ (图 6)，起到了弱的“碳汇”作用，这与很多学者认为的“第二次土壤普查以来我国耕地土壤有机碳呈增加趋势的研究结果相一致”^[28-30]。这一方面是因为自 1980 年第二次土壤普查以来氮肥和有机肥施用量大幅增加，从而提高了植物生长量和秸秆还田量，增加土壤碳输入^[31-32]。据统计，1980 年福建省 5 个典型县的平均氮肥和有机肥施用量分别为 $123\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $20\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 N 计)，而 2009 年达到 $327\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $46\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 N 计)，增幅分别为 166% 和 128% (图 5)。另一方面 5 个典型县耕地土壤容重较大，为 $1.28\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，由表 1 可知，土壤容重与不同时段固碳速率存在极显著正相关，且相关性明显高于黏粒和 pH。很多研究表明，容重较高的土壤有机碳矿化作用弱，有利于土壤“碳汇”^[24]。此外，气候变化也在研究区耕地土壤有机碳长期变化中发挥着重要作用^[14]。尽管 1980—2009 年间福建省耕地土壤有机碳总体呈增加趋势，但在 2003 年呈“碳源”效应，主要是因为该年度降雨量和气温分别为 $1\ 144\ \text{mm}$ 和 $20.4\ ^\circ\text{C}$ ，较低的降雨量和较高的温度均不利于有机碳积累^[33-34]。进一步从图 7 也可以看出，2010—2039 年未来福建省耕地土壤有机碳的变化趋势与前 30 年基本一致，也整体呈弱的“碳汇”作用，年均固碳速率为 $176\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，固碳总量为 $7.04\ \text{Tg}$ ，说明目前的农业管理方式有利于研究区固碳。Xu^[12]

和 Yu 等^[35]分别结合土壤图与有机碳模型也发现中国农田土壤有机碳含量在未来持续上升，均与本研

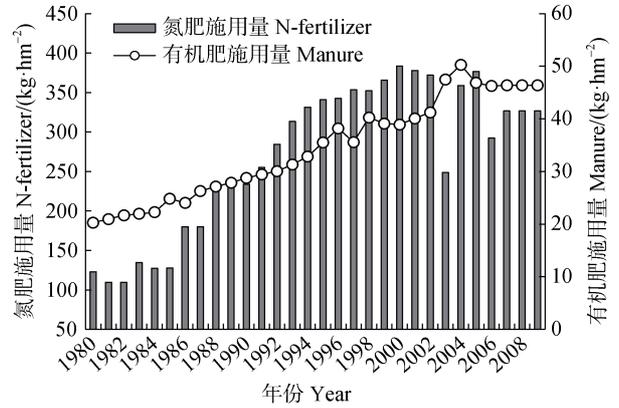


图 5 1980—2009 年五个典型县年均氮肥纯量和有机肥变化
Fig. 5 Variation of chemical fertilizer and manure application rate from 1980 to 2009 in five typical counties

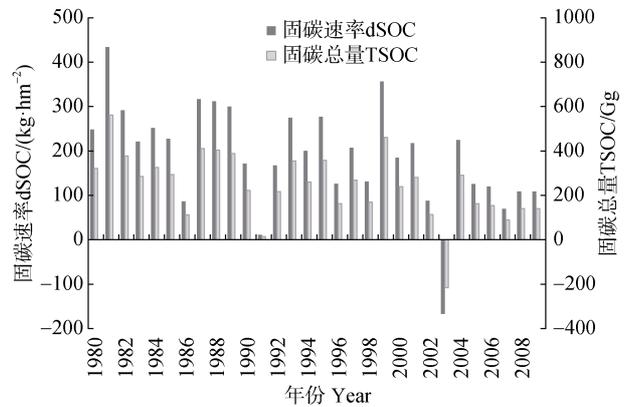


图 6 1980—2009 年福建省耕地土壤年均固碳速率和总量分布

Fig. 6 Distribution of average annual carbon sequestration rate and total carbon sequestration amount in Fujian Province from 1980 to 2009

表 1 模型输入 5 个典型县起始土壤属性与不同时段固碳速率逐步回归分析结果

Table 1 Stepwise regression analysis for model input of soil attributes contributing to the carbon sequestration rate

年段 Periods	模拟单元 Number of polygon	ΔR^2				R^2_{adj}
		有机碳 SOC / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	容重 Bulk density / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏粒 Clay /%	pH	
1980—2009 年	22 676	0.000***	0.247***	0.02***	0.04***	0.307***
2010—2039 年	41 867	0.013***	0.240***	0.031***	—	0.284***

注：*，**和***分别表示 $P < 0.05$ ，0.01 和 0.001 水平上显著相关； ΔR^2 和 R^2_{adj} 分别表示变异解释度和调整后的变异解释度。Note: *, **and*** significant at 0.05, 0.01 and 0.001 correlation level respectively; ΔR^2 and R^2_{adj} significant degree of variant explain and adjusted degree of variants explain respectively.

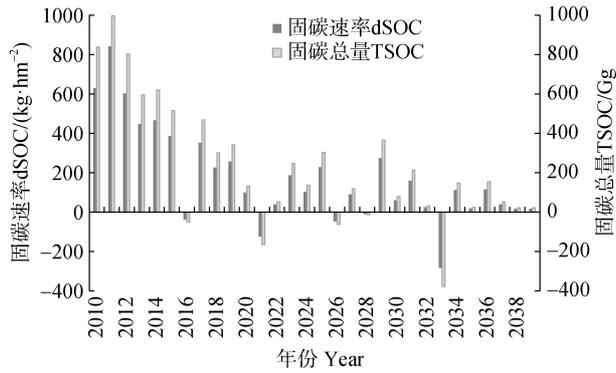


图 7 2010—2039 年福建省耕地土壤年均固碳速率和总量分布

Fig. 7 Distribution of average annual carbon sequestration rate and total carbon sequestration amount in Fujian Province from 2010 to 2039

究结果一致。但与 1980—2009 年相比, 2010—2039 年福建省耕地土壤的固碳速率和总量分别降低了 7.26% 和 4.48%, 主要是由于随着时间的推移, 土壤固碳水平逐渐达到饱和状态, 导致固碳速率和总量有所下降^[36]。

2.3 福建省不同土类耕地的固碳速率和潜力

福建省不同土类耕地的固碳速率和潜力差异很大(表 3)。其中, 水稻土为全省最主要的耕作土壤, 分布面积占福建省耕地总面积的 80% 以上, 该土类

1980—2009 年和 2010—2039 年的平均固碳速率分别为 212 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 185 kg·hm⁻²·a⁻¹, 固碳量分别达到 6 808 Gg 和 6 577 Gg, 均占全省固碳总量的 92% 左右, 这与许多学者认为近 30 年我国水田土壤碳库处于明显增长的研究结果相一致^[37-38]。一方面是因为水稻土长期处于淹水还原状态, 土体紧实, 起始容重较大, 不利于土壤有机碳的微生物分解; 另一方面是由于该土类人为施肥量大, 水耕熟化程度高, 有利于土壤有机碳累积^[39-40]。福建省赤红壤和滨海盐土的固碳速率也较高, 1980—2009 年和 2010—2039 年两个时段的固碳速率均在 176~322 kg·hm⁻²·a⁻¹ 之间, 固碳总量介于 4.2~577 Gg 之间。前者主要由砖红性红壤旱耕熟化形成, 自身土壤有机碳含量低, 而后者主要分布在海岸带附近, 砂粒含量一般在 65% 以上, 土壤有机碳难以累积, 导致其起始土壤有机碳含量也较低^[39]。据统计, 赤红壤和滨海盐土的起始土壤有机碳含量分别仅为 8.9 g·kg⁻¹ 和 8.8 g·kg⁻¹, 很多研究表明, 起始有机碳含量低的土壤由于分解速率小而在后期的演变过程中表现出较大固碳潜力^[40]。此外, 黏粒含量在一定程度上也会影响固碳速率, 赤红壤和滨海盐土的黏粒含量分别为 25% 和 23%, 均高于其他土类, 较高的黏粒含量也有利于碳的积累^[41]。

表 2 5 个典型县不同土类有机碳年均变化量与起始土壤属性逐步回归分析结果

Table 2 Stepwise regression analysis of annual organic carbon variation and initial soil properties in different soil groups at different periods of five typical counties

土类 名称 Soil group	模拟单元 Number of polygon	1980 年				R^2_{adj}
		ΔR^2				
		有机碳 SOC/ (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	黏粒 Clay/%	pH	
水稻土 Paddy soils	21208	—	0.303***	0.031***	0.066***	0.400***
红壤 Res soils	792	0.814***	—	0.023***	0.022***	0.859***
黄壤 Yellow soils	52	0.588***	—	—	0.172***	0.760***
滨海盐土 Coastal solonchaks	6	0.972***	—	0.024***	—	0.996***
紫色土 Purplish soils	7	0.528***	—	0.410***	—	0.938***
赤红壤 Latosolic red soils	479	0.947***	—	0.006***	0.002***	0.955***
潮土 Fluvo-aquic soils	132	0.915***	—	0.005***	0.013***	0.933***

注: *, **和***分别表示 $P < 0.05$, 0.01 和 0.001 水平上显著相关; ΔR^2 和 R^2_{adj} 分别表示变异解释度和调整后的变异解释度。

Note: *, **and*** significant at 0.05, 0.01 and 0.001 correlation level respectively; ΔR^2 and R^2_{adj} significant degree of variant explain and adjusted degree of variants explain respectively.

表 3 不同时段福建省各土壤类型的固碳速率和总量分布

Table 3 Distribution of average annual carbon sequestration rate and total carbon sequestration amount of different soil group in Fujian Province at different periods

土类 名称 Soil group	1980—2009 年 Year 1980—2009			2010—2039 年 Year 2010—2039		
	固碳速率 Carbon sequestration rate/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	面积 Area/ (× 10 ³ hm ²)	总固碳量 TSOC/ (Gg)	固碳速率 Carbon sequestration rate/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	面积 Area/ (× 10 ³ hm ²)	总固碳量 TSOC/ (Gg)
水稻土 Soils	212	1 070	6 808	185	1 187	6 577
滨海盐土 Coastal solonchaks	176	4.2	22	303	0.7	6.5
紫色土 Purplish soils	-8	1.4	-0.30	90	1.6	4.2
红壤 Red soils	-23	90	-61	2.7	81	6.6
黄壤 Yellow soils	43	11	14	130	4.3	17
潮土 Fluvo-aquic soils	30	11	10	88	21	369
赤红壤 Latosolic red soils	179	108	577	322	38	56
总计 Total	190	1295	7370	176	1333	7037

红壤、紫色土、黄壤和潮土 4 个土类在不同时段的固碳速率均较低，1980—2009 年介于 -23 ~ 43 kg·hm⁻²·a⁻¹，固碳总量在 -61 ~ 14 Gg 之间，而 2010—2039 年介于 3 ~ 130 kg·hm⁻²·a⁻¹，固碳总量在 6.5 ~ 56 Gg 之间。这 4 个土类固碳速率较低主要是由于他们较高的起始土壤有机碳含量（14 ~ 17 g·kg⁻¹）、较低的黏粒（19% ~ 21%）以及较低的容重（1.26 ~ 1.28 g·cm⁻³）有关。有研究表明，土壤有机碳含量越高和容重越低，越有利于土壤微生物的活动，不利于土壤有机碳的固持^[42]（表 3）。2010—2039 年间这 4 个土类的固碳速率均有所增加，其中红壤、紫色土和潮土主要是由于人为耕作和肥料的大量投入，土壤熟化度逐年提高，增加了土壤有机碳含量，而黄壤多分布于海拔较高的地区，年均温度低，微生物活动较弱从而导致了土壤有机碳的积累^[26]。

总体来看，福建省不同土壤类型耕地的年均固碳速率差异与其起始属性值（起始有机碳含量、黏粒含量和容重等）有很大的关系，尤其初始土壤有机碳高低在一定程度上决定着后期的固碳速率大小。韩冰等^[43]通过对辽宁省土壤碳库的研究也发现，在土壤有机质（有机碳）含量高的情况下，经过农

业耕作后，土壤碳的损失量也很大；而土壤有机质含量低时，碳损失量也较少，当土壤有机质含量到达某一低值后，土壤碳变化很小或开始增加，本研究一定程度上证实了这一点。

2.4 福建省不同亚类耕地的固碳速率和潜力

1980—2009 年和 2010—2039 年两个时段的福建省不同亚类耕地土壤有机碳变化趋势基本一致（表 4）。盐渍水稻土和淹育水稻土不同时段固碳速率均最大，介于 348 ~ 457 kg·hm⁻²·a⁻¹，固碳总量在 129 ~ 894 Gg 之间。前者是因为该亚类成土母质多为酸性结晶盐风化物，砂粒含量高而黏粒含量低，土壤有机碳起始值仅为 8.9 g·kg⁻¹；后者是由于该亚类是旱作坡地种植水稻后发育而成的土壤，开垦殖时间短，土壤氧化过程强且好气性分解旺盛，起始有机碳含量较其他亚类低，仅为 9.2 g·kg⁻¹，均易于固碳。相对而言，渗育水稻土和潜育水稻土的固碳速率较低，不同时段介于 158 ~ 228 kg·hm⁻²·a⁻¹ 之间。前者主要是因为淹水时间较长，起始土壤有机碳含量较高，为 17.4 g·kg⁻¹，有机碳易损耗；后者主要处于区域优越的平原和盆地区，农业投入高，土壤熟化度高，起始土壤有机碳含量达到 17.9 g·kg⁻¹，导致其固碳速率低于其他亚类^[29]（表 4）。但是渗育水稻土和潜育水稻土不

同时段的固碳总量较高, 总计分别占 1980—2009 年和 2010—2039 年间全省固碳总量的 68.39% 和 76.70%, 主要与这两个亚类在福建省的分布面积最广, 总计占全省耕地总面积的 67% 以上有关。潜育水稻土和漂洗水稻土 1980—2009 年固碳速率介于 $214 \sim 290 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 固碳总量在 $132 \sim 790 \text{ Gg}$ 之间, 但 2010—2039 年固碳速率介于 $40 \sim 90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 相较于 1980—2009 年这两个亚类的固碳速率下降较快,

降幅分别为 81.2% 和 69.8%。其中潜育水稻土通常分布于地下水位较高的低洼地区, 土体长期处于水饱和状态, 从而碳素分解较为缓慢^[25]。据统计, 该亚类有机碳起始值较高, 为 $19.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高有机碳起始值不利于后期土壤固碳; 而漂洗水稻土是由于其成土母质多为酸性结晶盐风化物, 酸性较强, 不利于微生物活动, 矿化速率缓慢, 导致有机碳起始值也达到 $15.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不利于后期有机碳的累积。

表 4 不同时段福建省各土壤亚类的固碳速率和总量分布

Table 4 Distribution of average annual carbon sequestration rate and total carbon sequestration amount of different soil subgroup in Fujian Province at different periods

亚类 名称 Soil subgroup	1980—2009 年 Year 1980—2009			2010—2039 年 Year 2010—2039		
	固碳速率		总固碳量 TSOC/ (Gg)	固碳速率		总固碳量 TSOC/ (Gg)
	Carbon sequestration rate/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积 Area/ ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)		Carbon sequestration Rate/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	面积 Area/ ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	
淹育水稻土 Submergenic paddy soils	423	12	150	348	86	894
渗育水稻土 Percogenic paddy soils	228	436	2981	195	538	3149
潜育水稻土 Hydromorphic paddy soils	158	433	2059	174	431	2245
潜育水稻土 Gleyed paddy soils	214	123	790	40	109	132
漂洗水稻土 Bleached paddy soils	299	15	132	90	10	28
盐渍水稻土 Salinized paddy soils	457	51	696	363	12	129
滨海盐土 Coastal solonchaks	176	4.2	22	303	0.7	6.5
酸性紫色土 Acid purplish soils	-8	1.4	-0.30	90	1.6	4.2
红壤 Red soils	-23	90	-61	2.7	81	6.6
黄壤 Yellow soils	43	11	14	130	4.3	17
灰潮土 Gery fluvo-aquic soils	30	11	10	88	21	369
赤红壤 Latosolic red soils	179	108	577	322	38	56
总计 Total	190	1295	7370	176	1333	7037

总体来看, 本研究中尽管使用了目前我国区域尺度最详细的 1: 50 000 大比例尺土壤数据库和近 4 万点实测土壤样点数据对福建省不同耕地土壤类型固碳速率和潜力进行了估算, 并运用了能充分体现土壤属性空间异质性的“图斑”为最小模拟单元改进了模型的执行, 但由于模型内部参数设置和目前可获取资料的限制, 模拟结果依然在以下 3 个方面存在不确定性: (1) 由于城市化进程, 研究区土地

利用方式在 1980—2009 年间会发生改变, 而当前 DNDC 模型的区域模拟模块无法输入每年的土地利用变化, 从而导致了一定的模拟误差; (2) 本研究基于 1980—2009 年的气象数据模拟未来 2010—2039 年的土壤有机碳变化, 未考虑未来可能出现的极端气候对有机碳模拟的影响, 也会一定程度上增加模拟结果的不确定性; (3) 本次模拟中气象资料和农业管理资料均来自目前区域尺度可获取、最详细的

“县”为输入单位，在模拟过程中认为每个县均是均质的，从而忽略了“县内”这些数据的空间异质性。因此，在今后的模拟中应尽可能收集更为详细的统计数据 and 实时的土地利用遥感数据，以提高模型模拟精度，降低模拟结果的不确定性。

3 结 论

明确福建省耕地目前的固碳速率和未来的固碳潜力对于制定我国亚热带地区农田“固碳减排”政策具有重要意义。从本研究来看，福建省耕地 1980—2009 和 2010—2039 年两个时段的固碳总量分别为 7.37 Tg 和 7.04 Tg，年均固碳速率分别为 $190 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $176 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，这说明该地区当前的农田管理措施有利于耕地土壤固碳，应该继续推广。此外，水稻土和盐渍水稻土分别在土类和亚类级别中固碳速率最大，不同时段年均土壤有机碳变化量均大于 $175 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；而红壤土类和亚类的固碳速率最小，不同时段年均土壤有机碳变化量介于 $-29\sim 3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间。因此，在今后“碳汇”政策制定中，针对具体的土壤类型制定相应的管理措施是十分必要的。

参考文献 (References)

- [1] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 61 (1/2): 77—92.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304 (5677): 1623—1627.
- [3] Liu Q H. Spatial distribution of organic carbon in paddy soils in China and its main influencing factors [D]. Nanjing: Institute of Soil Science, China Academy of Sciences, 2006. [刘庆花. 中国水稻土有机碳空间分布及其主要影响因素研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006.]
- [4] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20 (3): 229—236.
- [5] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Advance in a terrestrial biogeochemical model—DNDC model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (2): 91—96.
- [6] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97 (D9): 9759—9776.
- [7] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC(DeNitrification DeComposition): Model evolution[J]. Ecological Modelling, 2014, 292: 51—62.
- [8] 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.]
- [9] Li H, Wang L G, Li J Z, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture[J]. Ecological Modelling, 2017, 348: 1—13.
- [10] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019, 567 (7749): 516—520.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Xu S X, Zhao Y C, Shi X Z, et al. Map scale effects of soil databases on modeling organic carbon dynamics for paddy soils of China[J]. Catena, 2013, 104: 67—76.
- [14] 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.
- [15] Xu S X, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Modeling carbon dynamics in paddy soils in Jiangsu Province of China with soil databases differing in spatial resolution[J]. Pedosphere, 2011, 21 (6): 696—705.
- [16] Zhang F, Li C S, Wang Z, et al. Modeling impacts of management on farmland soil carbon dynamics along a climate gradient in Northwest China during 1981-2000[J]. Ecological Modelling, 2015, 312: 1—10.
- [17] Liu Y H, Yu Z R, Chen J, et al. Changes of soil organic carbon in an intensively cultivated agricultural region: A denitrification-decomposition (DNDC) modelling approach[J]. Science of the Total Environment, 2006, 372 (1): 203—214.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] Fujian Provincial Bureau of Statistics. Fujian economic and social statistical yearbook[M]. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 2015: 241. [福建省统计局. 福建经济与社会统计年鉴[M]. 福州: 福建人民出版社, 2015: 241.]
- [21] Wang Y X, Weng B Q. Estimate of soil organic carbon density and its stock in Fujian Province[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 20 (1): 42—45. [王义祥, 翁伯琦. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算[J]. 福建农业学报, 2005, 20 (1): 42—45.]
- [22] 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.]
- [23] Chen Z X, Zhang N, Zhang L M, et al. Scale effects of estimation of soil organic carbon storage in Fujian Province, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (3): 606—619. [陈中星, 张楠, 张黎明, 等. 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究[J]. 土壤学报, 2018, 55 (3): 606—619.]
- [24] 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.]
- [25] 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.]
- [26] 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.]
- [27] Song G H, Pan G X, Zhang Q. Topsoil SOC storage of China agricultural soils and its loss by cultivation. Biogeochemistry, 2005, 74 (1): 47—62.
- [28] Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. Modeling soil organic carbon change in croplands of China, 1980—2009[J]. Global and Planetary Change, 2012, 82/83 : 115—128.
- [29] Liang E, Cai D X, Dai K, et al. Changes in soil organic carbon in croplands of China: II Estimation of soil carbon sequestration potentials[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010 (6): 87—92. [梁二, 蔡典雄, 代快, 等. 中国农田土壤有机碳变化: II 土壤固碳潜力估算[J]. 中国土壤与肥料, 2010 (6): 87—92.]
- [30] Li Y. Estimation of soil organic carbon changes in farmland in Fujian Province based on landsat remote sensing image and 1 : 50 000 soil database[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. [李亚. 基于 Landsat 遥感影像和 1 : 5 万土壤数据库的福建省耕地有机碳动态变化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.]
- [31] Brar B S, Singh K, Dheri G S, et al. Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128 : 30—36.
- [32] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, 136 (3/4): 708—715.
- [33] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168 (1/2/3): 241—257.
- [34] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, et al. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140 (1/2/3/4): 220—235.
- [35] Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. Projected changes in soil organic carbon stocks of China's croplands under different agricultural managements, 2011-2050[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 178 : 109—120.
- [36] Álvaro-Fuentes J, Paustian K. Potential soil carbon sequestration in a semiarid Mediterranean agroecosystem under climate change: Quantifying management and climate effects[J]. Plant and Soil, 2011, 338 (1/2): 261—272.
- [37] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32 (11/12): 1485—1498.
- [38] Zhuang H Y, Liu S P, Shen X P, et al. Effect of long term minimal and zero tillages on rice and wheat yields, soil organic matter and bulk density[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(4): 39—44. [庄恒扬, 刘世平, 沈新平, 等. 长期少免耕对稻麦产量及土壤有机质与容重的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 32 (4): 39—44.]
- [39] Soil Survey Office of Fujian Province. Fujian soil[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1991. [福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991.]

- [40] Guo N J, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Comparative study on impacts of anthropogenic and environment factors on soil organic matter: A case study of typical black soil region and paddy soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1097—1106. [郭乃嘉, 史学正, 赵永存, 等. 人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究——以典型黑土区和水稻土区为例[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (5): 1097—1106.]
- [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] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems : Sensitivity and upscaling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18 (1): GB1043.
- [43] 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)