

# 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究\*

陈中星<sup>1, 2</sup> 张楠<sup>1, 2</sup> 张黎明<sup>1, 2†</sup> 袁平<sup>1, 2</sup> 姚彩燕<sup>1, 2</sup> 邢世和<sup>1, 2</sup>  
邱龙霞<sup>1, 2</sup> 陈翰阅<sup>1, 2</sup> 范协裕<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)

**摘要** 土壤有机碳储量的准确估算对于研究全球碳“源/汇”动态变化至关重要, 但目前使用大、中、小系列比例尺土壤数据库对我国亚热带土壤有机碳储量估算的影响并不清楚。基于此, 选择位于亚热带地区的福建省作为研究区, 系统分析1:5万、1:20万、1:50万、1:100万、1:400万、1:1000万6种目前我国常用制图尺度土壤数据库对有机碳储量估算的影响。结果表明: 6个制图尺度下表层土壤(0~20 cm)的有机碳储量为: 552、637、573、573、614和549 Tg C; 剖面土壤(0~100 cm)的有机碳储量为1396、1502、1321、1395、1508和1532 Tg C。不同土壤类型下受制图尺度影响最大的是粗骨土, 表层和剖面的有机碳储量相对偏差分别达到 $8.88 \times 10^5\%$ 和 $8.13 \times 10^5\%$ 。不同行政区下表层和剖面受制图尺度影响最大的分别是厦门市和福州市, 表层和剖面的有机碳储量相对偏差分别为26.44%和27.97%。总体而言, 制图尺度的不同将会对福建省土壤有机碳储量估算造成很大影响, 这也进一步说明了亚热带地区选择适宜的制图尺度是十分必要的。

**关键词** 制图尺度; 土壤有机碳密度; 土壤有机碳储量; 福建省

**中图分类号** S15 **文献标识码** A

土壤有机碳在生态系统中起着重要作用, 其储量约为1500 Pg (1 Pg=10<sup>15</sup> g), 是大气碳库的3倍、植被碳库的2.5倍, 其较小幅度变化将会对大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度产生剧烈影响<sup>[1]</sup>。我国的土地面积居世界第三位, 土壤类型众多, 在全球温室气候变化研究中占据着十分重要的地位<sup>[2]</sup>。近年来, 国际社会不断寻找控制气候变化的最佳途径, 土壤固碳效应被广泛认为是能够延缓全球气候变化的有效措施<sup>[1, 3]</sup>, 而精确估算土壤有机碳储量和明确其空间分布特征是制定固碳减排政策的前提。

目前, 基于土壤普查资料并结合数字化土壤图进行有机碳储量估算的方法越来越普遍。国外, Eswaran<sup>[4]</sup>于1993年基于16000个土壤剖面和其他已经发表的文献数据, 采用FAO-UNESCO土壤图估算出全球土壤有机碳的储量大约为1576 Pg。Martín等<sup>[5]</sup>基于4401个样点对西班牙有机碳储量进行估算, 结果表明该地区表层土壤(0~20 cm)有机碳储量和平均密度分别为2.8 Pg和56.57 Mg hm<sup>-2</sup>。Veronesi等<sup>[6]</sup>使用英国和威尔士的土壤调查数据对米德兰兹郡西部面积约为13948 km<sup>2</sup>区域的碳储量进行了估算, 结果表明, 该地区表层和

\* 福建省2011计划项目(K80ND8002)、福建省自然科学基金项目(2015J01154)和福建省高校杰出青年科研人才计划基金项目(JA13093)共同资助 Supported by the Collaborative Innovation for Juncao Ecology Industry (No. K80ND8002), the National Science Foundation of Fujian Province, China(No.2015J01154), and the Distinguished Young Scholars Foundation of the Higher Education Institutions of Fujian Province, China (No.JA13093)

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

作者简介: 陈中星(1992—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳循环与GIS研究。E-mail: miruo1117@163.com

收稿日期: 2017-08-15; 收到修改稿日期: 2017-10-16; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-11-15

深层土壤有机碳储量分别为 $162.91 \pm 3.63 \times 10^{-5}$  Tg和 $66.71 \pm 3.52 \times 10^{-5}$  Tg。Dorji等<sup>[7]</sup>基于数字化土壤图和186个土壤剖面对喜马拉雅东部的山地森林系统的有机碳储量进行估算,结果表明该区域有机碳储量为27.1 Mt。国内利用Shi等<sup>[8]</sup>提出的“PKB”(Pedological Knowledge Based method)法进行土壤有机碳储量估算的研究比较多。该方法主要根据土壤类型相一致与相似性、土壤成土母质相近或者相同、土壤剖面点位置与分布区域的一致或邻近等原则,将土壤数据库中每个土壤剖面的属性数据与空间数据库中相对应的土壤类型图斑单元连接起来。如,于东升等<sup>[9]</sup>利用1:100万土壤数据库,并采用“PKB连接法”将7 292个剖面数据和土壤图中的94 000多个图斑连接,通过面积加权平均法得出我国的土壤有机碳储量为89.14 Pg,有机碳平均密度为 $9.60 \text{ kg m}^{-2}$ 。Zhi等<sup>[10]</sup>利用浙江省1:5万土壤数据库和2 154个土壤剖面属性资料,采用“PKB连接法”估算出全省的土壤有机碳储量为831.49 Tg,土壤有机碳平均密度为 $8.69 \text{ kg m}^{-2}$ 。李晓迪等<sup>[11]</sup>采用“PKB连接法”估算出苏北旱地地区在1:5万土壤数据库基础上有机碳密度和储量分别为 $1.56 \text{ kg m}^{-2}$ 和61.20 Tg(1 Tg= $10^{12}$ g)。

但是从以上的研究可以看出,我国的国家 and 区域土壤有机碳储量估算中大多数使用的是单一制图尺度土壤数据库,未考虑大、中、小系列比例尺土壤数据库对有机碳估算的影响。不同比例尺土壤数据库对有机碳空间分布的表达差异较大,土壤图图斑及其连接的属性会随着比例尺的改变而发生明显变化<sup>[12]</sup>。有统计表明,目前我国土壤有机碳储量估算的最小值为50 Pg,而最大值为185.69 Pg,二者相差近4倍,这说明使用不恰当的制图尺度将会导致估算结果产生极大的不确定性<sup>[13-14]</sup>;此外,国家尺度的土壤碳储量估算大多数是以小比例尺(1:100万、1:400万、1:1 000万)为基础资料,而这些小比例尺下的图斑概化对有机碳储量估算精度的影响程度尚不清楚<sup>[15-16]</sup>。福建省森林覆盖率高达65.95%,居全国第一,森林生产力高,土壤输入有机质量多,有利于土壤有机碳积累<sup>[17-18]</sup>,明确该地区有机碳储量估算精度受目前常用制图比例尺土壤数据库的影响程度,对我国国

家尺度和亚热带地区制定合理的固碳减排政策提供有力依据。基于此,本研究以整个地区均属于亚热带的福建省作为研究区,分别计算“PKB连接法”建立的目前我国常用6种制图尺度(1:5万、1:20万、1:50万、1:100万、1:400万、1:1 000万)表层和剖面土壤数据库下的有机碳密度和储量,并以目前土壤数据最为详尽的1:5万尺度估算值为基准,定量评价其他制图尺度的误差,结果可为我国亚热带地区土壤有机碳研究中选择适宜的制图尺度和定量化不同制图尺度的估算精度提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海(115° 50' ~ 120° 40' E, 23° 33' ~ 28° 20' N),属于亚热带海洋性季风气候(图1)。根据全省66个气象站点的统计得出,年平均气温为14.6~21.3℃,年均降水量为1 037~2 051 mm,气候温暖,雨量充足。福建省土壤类型以红壤为主,达 $7.66 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占全省土壤总面积63.41%;水稻土为分布最广的耕作土壤,面积仅次于红壤,总面积 $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占全省土壤总面积8.71%;其他土壤类型(如滨海盐土、潮土、风砂土、山地草甸土、石灰土、新积土等)面积较小<sup>[19]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究所使用的制图尺度土壤数据库来自全国第二次土壤普查成果,由属性数据库和空间数据库两部分组成。其中,数据最为详细的1:5万尺度土壤图空间数据库来自福建省84个县(市)第二次土壤普查纸质资料。借助ArcGIS工作平台,采用双标准纬线等积圆锥投影对第二次土壤普查纸质图件进行数字化、编辑、修改并建立拓扑关系,建立该地区的空间数据库,全省共计12个土类、23个亚类和83个土属。福建省第二次土壤普查的各县(市、区)《土种志》中共记录的剖面点为3 082个,其属性数据包含土壤类型名称、土壤肥力和土壤理化性质等指标(图2)。由于第二次土壤普查时期没有GPS(Global Positioning System)仪器进行剖面点的准确定位,本研究

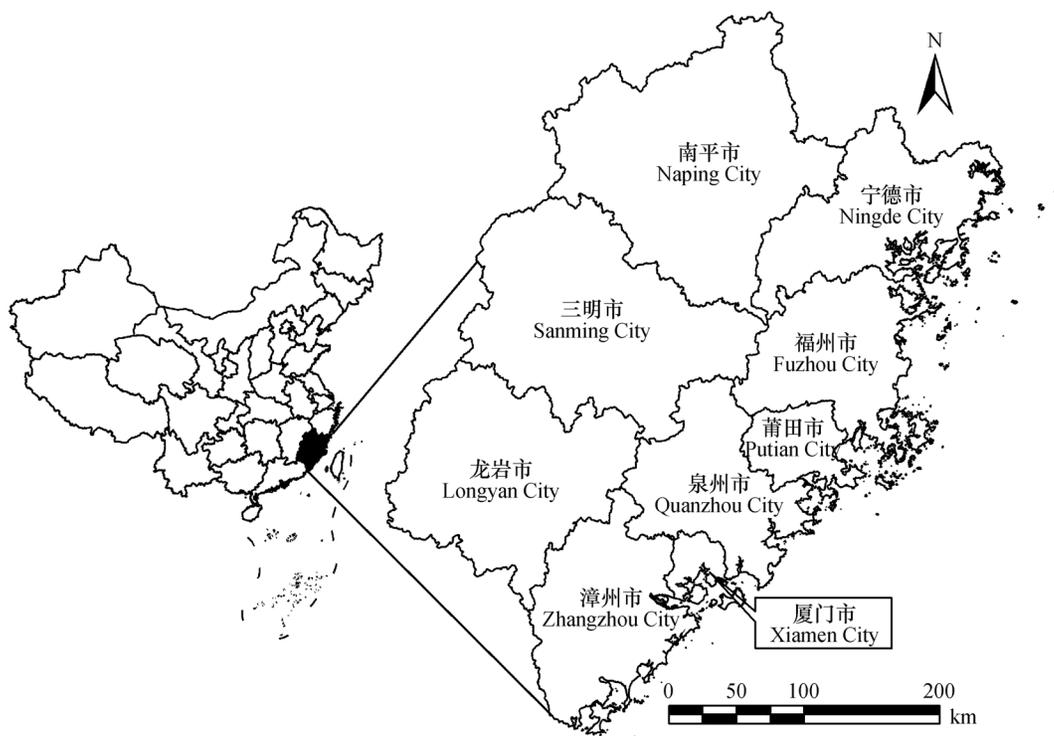


图1 福建省地理位置分布图

Fig. 1 Geographical location map of Fujian Province

根据第二次土壤普查《土种志》中记录的剖面点详细采样位置，以村界为限定区域，找出与该剖面土壤类型一致的土壤图最大面积“图斑”，“图斑”的中心点即认为是第二次土壤普查剖面采集位置，从而实现了纸质记录剖面点位置的GIS（地理信息系统）空间化。空间数据与属性数据的连接采用Shi等<sup>[8]</sup>提出的“PKB”进行连接。在连接过程中，既要考虑剖面的土壤类型与图斑土壤类型ID值相同，也要兼顾剖面的空间位置，当出现多个剖面点与一个图斑相对应的情况时，取多个剖面点的属性平均值赋予该图斑，而当一个剖面点对应多个图斑时，则取该剖面点的属性值赋予相对应的多个图斑<sup>[16]</sup>。所有土壤图制图单元均采用中国土壤发生分类系统（Genetic Soil Classification of China, GSCC），随着制图比例尺的降低，制图单元所对应的土壤分类级别也随之升高，1:5万~1:1 000万这6个制图比例尺的制图单元分别为土种、土属、土属、土属、亚类和亚类。在

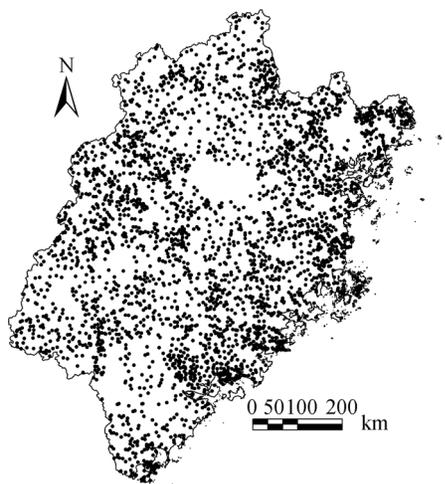


图2 1982年福建省土壤剖面点分布图

Fig. 2 Distribution of soil profiles (1982) in Fujian Province

制图尺度降低过程中，由于图斑概化导致的土壤类型归并，6个尺度土壤图的图斑数目依次为247 969、46 408、15 282、6 343、440和345个，分别利用了3 082、3 082、2 718、2 547、1 000和890个土壤剖面的理化属性数据（表1）。

表1 福建省1:5万~1:1 000万6个制图比例尺土壤图基本特征

比例尺 Mapping scale	图件来源 Source of soil maps	剖面数 Number of soil profiles	图斑数量 Number of polygons	制图单元 Basic mapping unit
1 : 50 000	福建省土壤普查办公室, 农业出版社 (1990) Soil Survey Office of Fujian Province, Agriculture Press (1990)	3 082	247 969	土种 Soil species
1 : 200 000	福建省土壤普查办公室, 农业出版社 (1990) Soil Survey Office of Fujian Province, Agriculture Press (1990)	3 082	46 408	土属 Soil genus
1 : 500 000	福建省土壤普查办公室, 农业出版社 (1990) Soil Survey Office of Fujian Province, Agriculture Press (1990)	2 718	15 282	土属 Soil genus
1 : 1 000 000	全国二次土壤普查办公室, 中国地图出版社 (1995) The Second National Soil Survey Office of China, Sinomaps Press (1995)	2 547	6 343	土属 Soil genus
1 : 4 000 000	中国科学院南京土壤研究所编制, 中国地图出版社 (1978) Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Sinomaps Press (1978)	1 000	440	亚类 Soil subgroup
1 : 10 000 000	中国科学院南京土壤研究所编制, 科学出版社 (1988) Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Science Press (1988)	890	345	亚类 Soil subgroup

### 1.3 土壤有机碳密度及储量计算

本研究采用土壤类型法估算福建省土壤有机碳储量, 以表层土壤0~20 cm和剖面土壤0~100 cm作为计算对象。

土壤有机碳密度指单位面积一定深度土层中的土壤有机碳储量。土壤有机碳密度的计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \delta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i}{100} \quad (1)$$

式中, SOCD为土壤剖面有机碳密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ );  $n$ 为参与计算的土壤层次总数;  $\delta_i\%$ 为第 $i$ 层 $> 2 \text{ mm}$ 砾石含量 (体积百分含量);  $\rho_i$ 为第 $i$ 层土壤容重 ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $C_i$ 为第 $i$ 层土壤有机碳含量 ( $\text{g kg}^{-1}$ ), 由土壤有机质含量 $\times 0.58$  (Bemmelen转换系数) 换算得到<sup>[21]</sup>;  $T_i$ 为第 $i$ 层土层厚度 (cm); 100用于单位换算。由于1982年福建省土壤普查剖面点资料中缺少容重信息, 本研究采用Song等<sup>[22]</sup>基于第二次土壤普查建立土壤容重与有机碳含量的回归模型:  $y=1.377 \times e^{-0.0048 \times \text{SOC}}$  ( $R^2=0.7870$ ,  $p<0.001$ ,  $n=4\ 765$ ), 式中SOC代表土壤有机碳

含量。

土壤有机碳储量指一定区域范围内土层中所包含的土壤有机碳总量。土壤有机碳储量的计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\text{SOCS} = \sum_{i=1}^n \text{SOCD}_i \times S_i \quad (2)$$

式中, SOCS为土壤剖面有机碳储量 ( $\text{kg}$ );  $\text{SOCD}_i$ 为第 $i$ 个土壤图斑的有机碳密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ );  $S_i$ 为第 $i$ 个土壤图斑的面积 ( $\text{m}^2$ );  $n$ 为图斑数。

### 1.4 不同制图比例尺下的相对偏差

本次研究采用相对偏差 (%) 的绝对值来表示不同制图尺度之间的土壤有机碳密度、储量和土壤面积差异大小:

$$Y = |(x_s - x_0) / x_0| \times 100 \quad (3)$$

式中,  $Y$ 为相对偏差 (%);  $x_s$ 为1:20万、1:50万、1:100万、1:400万和1:1 000万尺度计算的有机碳密度、储量和土壤面积;  $x_0$ 为土壤数据最详细的1:5万尺度计算的有机碳密度、储量和土壤面积。

### 1.5 不同制图比例尺的差异性检验

应用统计软件SPSS 22.0对不同制图尺度下的土壤有机碳密度独立样本T检验<sup>[24]</sup>, 分析1:20

万、1:50万、1:100万、1:400万和1:1000万尺度的有机碳密度与土壤数据最为详尽的1:5万尺度之间的差异显著性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同制图尺度下福建省土壤有机碳密度与储量分布

通过面积加权平均方法得到福建省1:5万~1:1000万6个制图尺度下表层(0~20 cm)土壤有机碳含量分别为:18.69 g kg<sup>-1</sup>、19.42 g kg<sup>-1</sup>、17.64 g kg<sup>-1</sup>、18.39 g kg<sup>-1</sup>、18.88 g kg<sup>-1</sup>和19.11 g kg<sup>-1</sup>;剖面(0~100 cm)土壤有机碳含量分别为:8.92 g kg<sup>-1</sup>、9.10 g kg<sup>-1</sup>、8.54 g kg<sup>-1</sup>、8.94 g kg<sup>-1</sup>、9.23 g kg<sup>-1</sup>和9.27 g kg<sup>-1</sup>。以数据最为详细的1:5万制图尺度为基准,1:50万尺度下表层和剖面土壤有机碳含量相对偏差最大,分别为5.59%和4.28%;1:400万制图尺度下表层相对偏差最小为1.03%,1:100万制图尺度下剖面相对偏

差最小为0.20%。结果表明:福建省表层土壤有机碳含量远大于剖面土壤有机碳含量,这是由于表层地表枯落物较为丰富,有机质含量较高,而剖面土壤受枯落物的影响较低,有机质含量相对较小<sup>[25]</sup>;此外,受到人为活动的影响,表层活性有机碳会随土壤深度的增加而降低,从而导致有机碳含量降低<sup>[26]</sup>。

从土壤有机碳密度来看,在数据最为详细的1:5万制图尺度下福建省土壤图斑约为247 969个,估算出全省土壤面积为12.08 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,表层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)土壤有机碳密度分别为4.57 kg m<sup>-2</sup>和11.55 kg m<sup>-2</sup>,有机碳储量分别为552.23 Tg和1 396 Tg。从表2可以看出,福建省表层土壤有机碳密度高于全国平均水平<sup>[14]</sup>和临近的广东<sup>[27]</sup>、广西<sup>[28]</sup>两省;此外,剖面土壤有机碳密度也高于全国平均水平和临近的广东<sup>[27]</sup>、浙江<sup>[10]</sup>两省,主要是由于该省山脉较多、气候温和湿润、植物覆盖面积大等有利于土壤有机碳积累的特殊地理环境所致<sup>[18]</sup>。

表2 不同省份表层和剖面土壤有机碳密度与储量

Table 2 SOC densities and SOCSs in the surface soil layers and profiles of different provinces

省份 Provinces	0~20 cm		0~100 cm	
	密度 Density (kg m <sup>-2</sup> )	储量 Storage (Pg)	密度 Density (kg m <sup>-2</sup> )	储量 Storage (Pg)
全国 Whole country <sup>[14]</sup>	2.97	27.4	9.13	84.40
全国 Whole country <sup>[12]</sup>	—	—	9.60	89.14
广东省 Guangdong Province <sup>[27]</sup>	3.84	0.68	9.60	1.71
广西省 Guangxi Province <sup>[28]</sup>	3.33	0.64	—	—
浙江省 Zhejiang Province <sup>[10]</sup>	—	—	8.69	0.88
福建省 Fujian Province	4.57	0.55	11.55	1.40

从图3a中可以看出,福建省表层土壤有机碳密度空间分布差异很大,最小值为0.09 kg m<sup>-2</sup>,最大值为13.62 kg m<sup>-2</sup>,二者之间相差接近158倍。土壤有机碳密度较大(>10 kg m<sup>-2</sup>)地区主要分布于福建省东北部、北部以及西部地区,合计面积为0.41 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占研究区土壤总面积的3.36%。福建省中部和西部地区相对于东部的气温较低,降雨量较大,低温湿润的环境条件能促进植被生长,使得有机碳积累的更快。土壤有机碳密度较小(<2.5 kg m<sup>-2</sup>)地区主要分布于福建省东南沿海地区,合

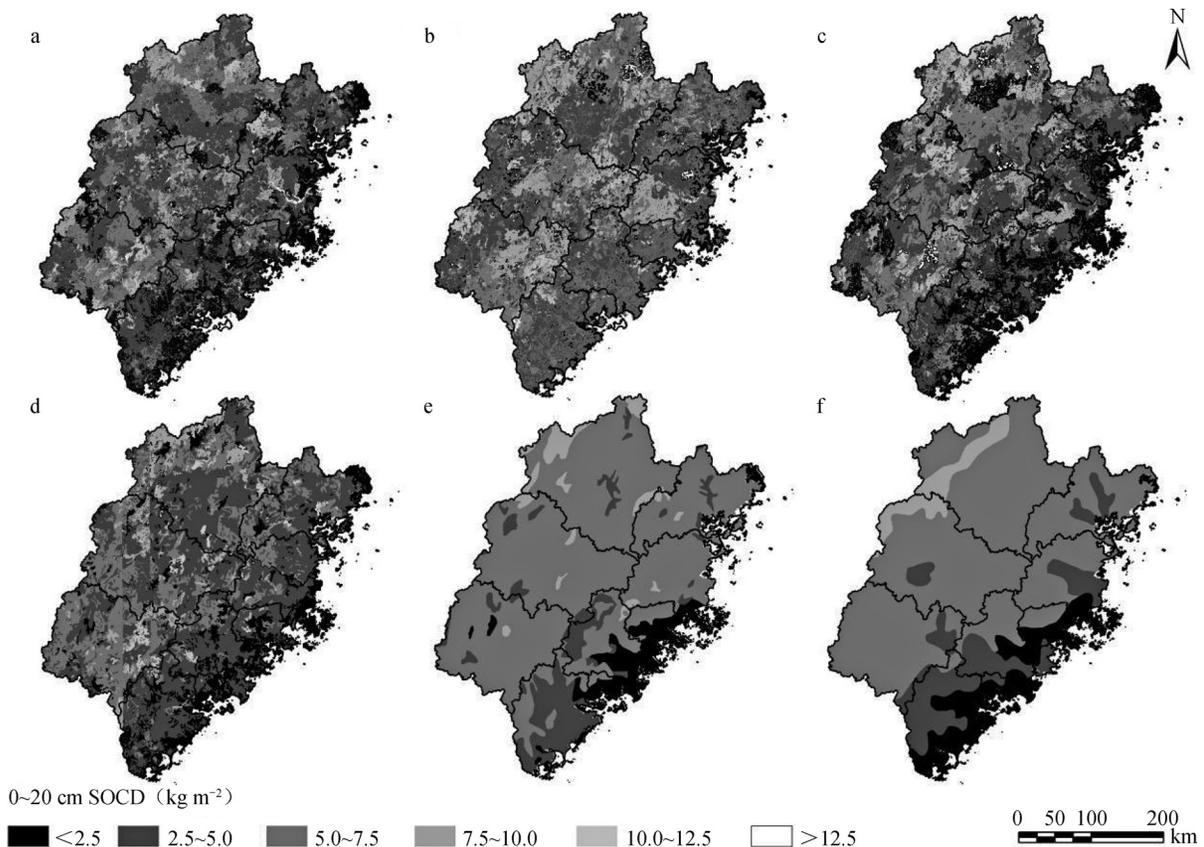
计面积为2.19 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占研究区土壤总面积的18.12%,这主要与该地区温度高,降雨量少不利于有机碳的积累有关。从图4a中可以看出,福建省剖面土壤有机碳密度空间分布差异也很大,最小值为0.10 kg m<sup>-2</sup>,最大值为50.42 kg m<sup>-2</sup>,二者之间相差超过500倍。剖面土壤中有有机碳密度较高(>20 kg m<sup>-2</sup>)的土壤分布于福建省东北部、北部以及西部地区,与土壤表层分布规律一致,面积为1.28 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占研究区土壤总面积的10.62%;土壤有机碳密度较小(<5 kg m<sup>-2</sup>)的区域同样主

要分布于福建省东南沿海地区。

从图3b~图3f和图4b~图4f可以看出,随着制图尺度的减小,福建省整个表层和剖面的土壤有机碳密度空间分布变化差异明显。以1:5万制图尺度为基准,表层和剖面土壤有机碳密度较大( $>10 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $>20 \text{ kg m}^{-2}$ )区域面积发生明显变化,1:20万和1:50万尺度下该含量范围面积急剧增加,相对偏差分别为85%~124%和11%~28%;而1:100万~1:1000万尺度下明显减少,相对偏差分别为38%~44%和7%~49%。表层和剖面土壤有机碳密度较小( $<2 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $<5 \text{ kg m}^{-2}$ )区域面积在不同制图尺度下也发生明显变化,相对偏差分别为1%~58%和7%~92%;其中1:400万和1:1000万这两个制图尺度下有机碳储量和密度估算结果有较高的不确定性,这主要是小比例尺下土壤类型的概化过程较其他尺度更为剧烈所致。1:400万制图尺度下滨海盐土、潮土、粗骨土、山地草甸土、新积土和紫色土这6个土类因图斑面积太小而

被概化;1:1000万制图尺度下除了上述6个土类被概化外,石灰土和风砂土也同样被概化,这也说明当制图尺度发生改变时,一方面不同土壤有机碳密度含量的空间分布位置会发生变化,如随着制图尺度减小,土壤有机碳密度较高的区域从福建省东北部和北部逐渐转移至福建省西北部和中部地区,而土壤有机碳密度较小区域位置并未发生改变,仍为福建省东南沿海区域;另一方面制图尺度较大的土壤图中分布面积大、范围较为广泛的土壤类型可能是制图尺度较小的土壤图制图单元中重要组成部分,分布面积小,范围较窄的土壤类型则可能在图斑概化过程中被删除或者归化至其他土类中<sup>[24]</sup>。

以1:5万尺度表层估算值为基准值,1:100万尺度下的有机碳密度和储量相对偏差最小,分别为0.82%和0.32%,而1:20万尺度下的相对偏差最大,分别为15.57%和15.34%,其他1:50万、1:400万和1:1000万尺度下的相对偏差分别为5.05%和3.80%、12.64%和11.13%、4.05%



注 Note: a.1:50 000, b.1:200 000, c.1:500 000, d.1:1 000 000, e.1:4 000 000, f.1:10 000 000

图3 福建省不同制图尺度土壤表层(0~20 cm)有机碳密度空间分布

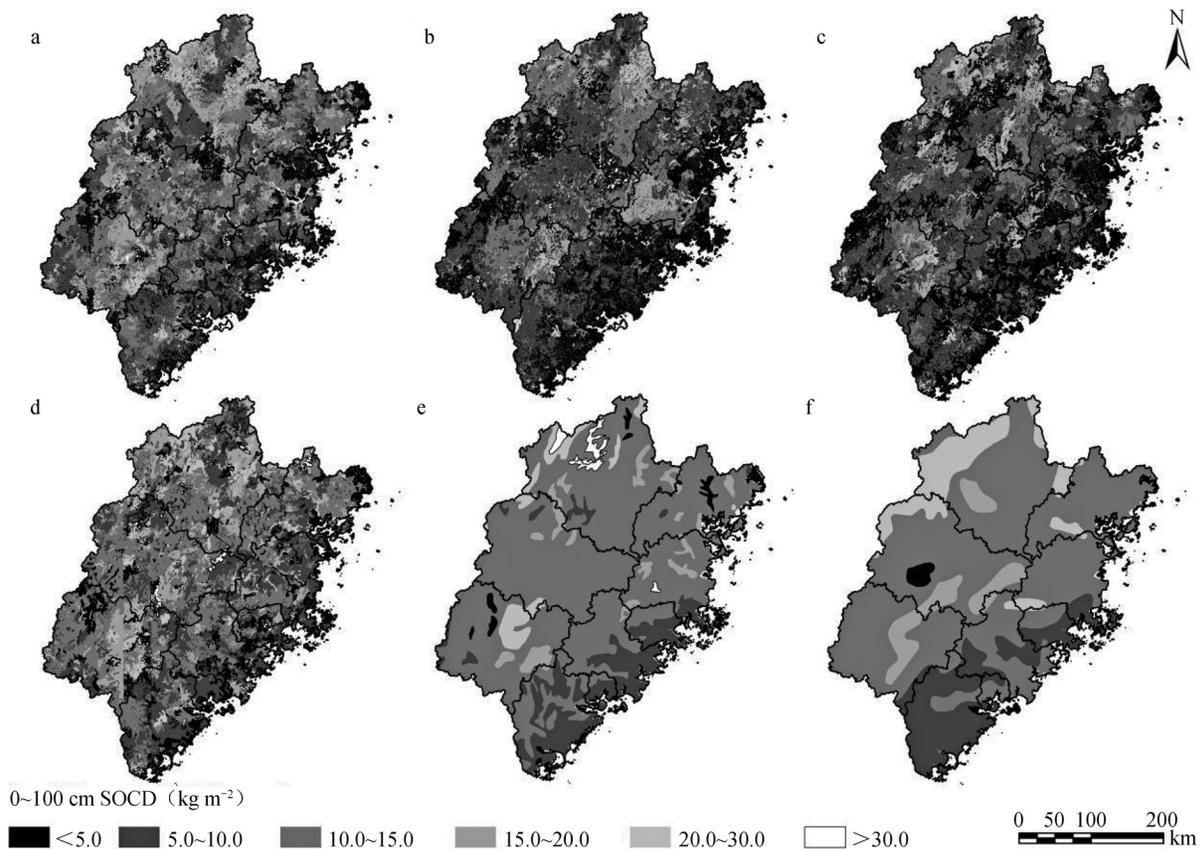
Fig. 3 Spatial distribution of organic carbon density in the surface soil layer (0~20 cm) of Fujian Province relative to mapping scale of the soil map

和3.79%。以1:5万尺度剖面估算值为基准,同样1:100万尺度下的有机碳密度和储量相对偏差最小,分别为0.26%和0.10%,而1:400万和1:1000万尺度下的相对偏差最大,分别为9.46%和8.00%、9.98%和9.72%,其他1:20万、1:50万和1:400万尺度下的相对偏差分别为7.84%和7.58%、4.22%和5.35%。表层下1:20万尺度下的相对偏差最大是因为该尺度下土壤有机碳密度较高(>7.5 kg m<sup>-2</sup>)的区域面积为2.74 M hm<sup>2</sup>,占1:20万研究区总面积的22.72%,相比于1:5万土壤有机碳密度较高的区域面积(1.51 M hm<sup>2</sup>,占1:5万研究区总面积的12.48%)增加近一倍,而在剖面下1:400万和1:1000万尺度的相对偏差最大是由于图斑的概化,分别仅有1000个和890个土壤剖面进入属性库,有机碳密度较小但面积较大的风砂土、滨海盐土、潮土等被归化为密度较大的水稻土和红壤,从而使得这两个尺度的土壤有机碳密度明显高于其他尺度。

上述研究表明:福建省土壤有机碳密度空间分布中大比例尺有机碳密度空间分布相对分散,具有一定的科学分布规律,而小比例尺有机碳密度在空间分布上趋于集中,这是由于小比例尺土壤数据库受概化过程的影响,图斑的单位面积增大、土壤剖面数量减少、土壤类型的相互归并所导致。随着制图尺度发生变化,某些土壤的空间分布发生改变,导致有机碳储量发生改变。有些密度较小的土壤如滨海盐土、粗骨土等在随着制图尺度发生变化时,这些土壤类型被概化为有机碳密度较大的红壤、黄壤等。同样某些密度较大的土壤如山地草甸土和新积土在制图尺度变小时,归并到水稻土、黄壤等有机碳相对密度较小的土壤类型中。由此可知,不同制图尺度所带来的估算结果差异性是由于空间分布所导致。

### 2.2 不同制图尺度下各土壤类型有机碳密度与储量分布

从表3可以得出,在数据最详细的1:5万尺度



注 Note: a.1:50 000, b.1:200 000, c.1:500 000, d.1:1 000 000, e.1:4 000 000, f.1:10 000 000

图4 福建省不同制图尺度土壤剖面(0~100 cm)有机碳密度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of organic carbon density in the soil profiles (0~100 cm) of Fujian Province relative to mapping scale of the soil map

下,福建省表层和剖面土壤中有有机碳密度最大的是山地草甸土,分别达到 $7.75 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $29.07 \text{ kg m}^{-2}$ ,该土类主要分布于中山山顶的平缓部位,年平均气温低( $18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),海拔较高( $1\ 430 \text{ m}$ ),降水量较大( $1\ 667 \text{ mm}$ ),草甸植被生长茂密且分解缓慢,使得土壤有机质富集明显<sup>[29]</sup>;其次,黄壤的有机碳密度也较高,表层和剖面分别为 $6.48 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $16.18 \text{ kg m}^{-2}$ ,该土类主要分布于中山地带,该区域温度低湿度高( $18.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 709 \text{ mm}$ ),导致表层积累大量的有机质。水稻土受到人为施肥的影响,且在水耕熟化过程中有机碳普遍呈现出积累的趋势<sup>[30]</sup>,导致表层和剖面有机碳密度分别达到 $3.93 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $11.17 \text{ kg m}^{-2}$ 。福建省有机碳密度最低的是风砂土和粗骨土,表层和剖面的有机碳密度分别为 $0.94 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $2.17 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $1.22 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $3.22 \text{ kg m}^{-2}$ ,这主要是因为前者主要分布于东南沿海地区,该地区干旱少雨气候不利于有机碳积累;此外,该土类中砂粒含量较高,占颗粒组成的85%以上,有研究表明,有机碳密度与土壤砂粒的含量呈极显著负相关关系<sup>[31]</sup>;而后者主要分布于边缘山丘地区,有机质和土壤养分贫瘠导致有机碳密度低。其他土类表层和剖面土壤有机碳密度分别介于 $2.19 \sim 4.83 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $5.18 \sim 11.91 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。

随着制图尺度的变化,土壤有机碳密度受制图尺度影响最大的土类为粗骨土,在1:5万尺度下表层和剖面的有机碳密度分别为 $1.22 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $3.22 \text{ kg m}^{-2}$ ,而在1:50万尺度下高达 $4.55 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $11.01 \text{ kg m}^{-2}$ ,相对偏差为273.24%和241.72%。土壤有机碳储量受制图尺度影响最大的也是粗骨土,在1:5万尺度下分别为 $0.001 \text{ Tg}$ 和 $0.0\ 035 \text{ Tg}$ ,而在1:50万尺度下分别为 $11.86 \text{ Tg}$ 和 $11.01 \text{ Tg}$ ,相对偏差分别达 $8.88 \times 10^5\%$ 和 $8.13 \times 10^5\%$ 。首先,该土类在1:5万数据库下只有16个图斑,面积为 $1.10 \times 10^2 \text{ hm}^2$ ,在1:20万和1:50万数据库下分别有107和378个图斑,面积分别为 $6.10 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 和 $2.61 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,其次,在1:20万和1:50万数据库下密度相对较大的山地草甸土、黄壤、红壤、水稻土等由于制图尺度的降低,被概化或归并为粗骨土,导致该土类有机碳密度增大。其次,不同制图尺度下石灰土表层和剖面土壤有机碳密度差异也很大,1:20万和1:50万尺度下相对偏差均大于60%,而在1:100万和1:400万制图尺度下相对

偏差均小于35%,这主要是由于在制图尺度降低过程中,该土类的图斑数量和面积均呈下降趋势。红壤和水稻土分别是福建省分布最广的自然和农业土壤,这两种土类储量占各制图尺度总储量的80%以上,这一方面由于二者的土壤有机碳密度相对较高,不同尺度下表层和剖面分别在 $4.83 \sim 5.76 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $3.92 \sim 4.89 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $11.12 \sim 13.28 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $11.09 \sim 14.08 \text{ kg m}^{-2}$ 之间;另一方面由于他们所占的面积较大,合计在不同尺度土壤总面积的80%以上。但相对而言,红壤受不同制图尺度的影响相对较小,表层和剖面土壤相对偏差均在4%~19%之间;而水稻土受不同制图尺度的影响相对较大,表层土壤有机碳密度的相对偏差在4%~19%之间,剖面土壤有机碳密度的相对偏差在11%~54%之间。

### 2.3 不同制图尺度下各行政区域有机碳密度与储量分布

表4可以看出,在1:5万制图尺度下,南平市和龙岩市表层和剖面土壤有机碳密度最高,分别为 $5.41 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $15.05 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $5.44 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $12.28 \text{ kg m}^{-2}$ ,这一方面由于两市背靠武夷山脉,距海较远,年平均气温低且降雨量较大( $18.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 722 \text{ mm}$ 和 $19.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 649 \text{ mm}$ ),低温多雨的气候条件有利于有机碳积累;另一方面由于两市耕地面积占福建省耕地资源比重最大,分别为16.69%、13.75%<sup>[32]</sup>,长期且持续肥料的施用以及生物积累能够有效增加土壤中有有机碳含量。厦门市表层和剖面土壤有机碳密度最低,分别为 $3.03 \text{ kg m}^{-2}$ 和 $7.84 \text{ kg m}^{-2}$ ,由于距海较近,年平均气温高且降雨量较小( $20.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\ 401 \text{ mm}$ ),且滨海地区土壤砂粒含量高,导致养分贫乏,从而有机碳含量低。

随着制图比例尺变化,表层和剖面土壤有机碳密度受制图尺度影响最大的是福州市,以1:5万尺度估算值为基准值,在1:400万制图尺度下的相对偏差最大,分别达到33.99%和40.14%;此外,在1:5万制图尺度下该市有16 922个图斑,包含新积土、石灰土、风砂土、潮土等11种土壤类型,而1:400万制图尺度下只有54个图斑,仅有水稻土、红壤、黄壤、赤红壤4种土壤类型。表层土壤有机碳密度和储量受制图尺度影响最小的是泉州市,1:20万~1:1 000万5个尺度下的相对偏差分别在1.24%~18.32%和0.06%~17.12%

表3 不同制图尺度数据库下福建省各土壤类型有机碳储量 (Tg) 和密度 (kg m<sup>-2</sup>)

土类Great soil groups	1 : 50 000			1 : 200 000			1 : 500 000			1 : 1 000 000			1 : 4 000 000			1 : 10 000 000		
	密度 Density	储量 Storage																
0 ~ 20 cm																		
滨海盐土Coastal solonchak	2.5	2.9	1.73	2.93	2.14	5.02	1.76	0.87	-	-	-	-	-	-	-	-		
潮土Fluvo-aquic soil	2.5	0.5	2.39	0.15	2.51	0.2	4.3	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-		
赤红壤Latosolic red earth	2.19	15.19	2.19	16.36	2.29	17.06	2.27	17.71	2.35	31.43	2.27	50.63	-	-	-	-		
粗骨土Skeletal soil	1.22	0.0 013	2.66	0.16	4.55	11.86	2.94	6.94	-	-	-	-	-	-	-	-		
风砂土Aeolian soil	0.94	0.5	1.09	0.55	0.99	0.52	0.83	0.28	0.6	0.17	-	-	-	-	-	-		
红壤Red earth	4.83	416.7	5.76	464.1	5.2	396.1	4.9	396.3	5.48	484.5	5.07	339.7	-	-	-	-		
黄壤Yellow earth	6.48	39.34	7.4	61.76	6.9	42.31	6.22	33.65	7.11	45.69	6.62	143.0	-	-	-	-		
山地草甸土Mountain meadow soil	7.75	0.66	6.66	0.48	7.56	0.53	6.86	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-		
石灰土Lithosol	3.37	0.53	5.51	0.29	6.15	0.51	3.95	0.35	4.49	0.93	-	-	-	-	-	-		
水稻土Paddy soil	3.93	70.84	4.18	83.54	4.17	93.4	3.92	86.3	4.89	50.99	4.11	39.9	-	-	-	-		
新积土Neo-alluvial soil	2.32	0.08	3.46	0.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
紫色土Purple soil	3.67	4.97	3.84	6.45	3.9	5.72	4.53	5.62	-	-	-	-	-	-	-	-		
0 ~ 100 cm																		
滨海盐土Coastal solonchak	8.67	10.07	4.8	8.1	7.7	18.08	6.46	3.19	-	-	-	-	-	-	-	-		
潮土Fluvo-aquic soil	5.29	1.06	4.51	0.28	4.1	0.33	5.44	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-		
赤红壤Latosolic red earth	6.12	42.4	5.81	43.64	7.23	53.93	7.83	60.96	7.71	103.3	7.49	166.7	-	-	-	-		
粗骨土Skeletal soil	3.22	0.0 035	7.18	0.44	11.01	28.69	6.45	15.2	-	-	-	-	-	-	-	-		
风砂土Aeolian soil	2.17	1.14	2.39	1.2	1.911	1	1.73	0.58	1.16	0.33	-	-	-	-	-	-		
红壤Red earth	11.91	1 027	13.28	1 070	11.4	869	11.12	899.04	12.8	1 132	12.45	833.5	-	-	-	-		
黄壤Yellow earth	16.18	98.27	15.56	129.8	14.12	86.54	16.47	89.15	19.71	126.6	19.25	415.5	-	-	-	-		
山地草甸土Mountain meadow soil	29.07	2.48	49.22	3.56	33.84	2.36	35.73	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-		
石灰土Lithosol	7.31	1.14	13.4	0.7	14.47	1.2	10.07	0.89	7.58	1.56	-	-	-	-	-	-		
水稻土Paddy soil	11.17	201.4	11.44	228.4	11.09	248.5	14.08	309.8	13.79	143.8	11.95	116.1	-	-	-	-		
新积土Neo-alluvial soil	5.18	0.18	9.08	0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
紫色土Purple soil	7.99	10.82	9.12	15.3	8.01	11.74	8.33	13.71	-	-	-	-	-	-	-	-		

之间；而剖面土壤有机碳密度受制图尺度影响最小的是龙岩市，1：20万~1：1 000万5个尺度下的相对偏差分别在0.48%~8.69%和0.43%~7.84%之间。总体而言，1：50万制图尺度下仅有厦门市剖面土壤有机碳密度相对偏差大于10%，其他行政区域剖面土壤有机碳密度和储量相对偏差均小于10%。很多学者研究表明，由于陆地系统是一个自然等级系统，在该系统内不同尺度上的主导过程是不同的，地表信息在时间上和空间上的分辨率均有很大的跨度，在某一尺度上人们观察到

的性质、总结出来的原理和规律，在另一个尺度上可能仍然有效，可能有相似性，也可能需要修改<sup>[33]</sup>。从本研究的结果来看，在福建省不同地级市下1：50万制图尺度空间有机碳密度及储量与目前大区域尺度数据最详尽的1：5万数据库比较接近。因此，福建省各地级市在缺乏精确土壤数据库的情况下，可使用1：50万制图尺度进行有机碳储量估算和农业管理措施的制定，这一方面可保证相对比较高的精度，另一方面数据容易获取，也可省时省力。

表4 不同制图尺度下福建省各行政区域土壤有机碳密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ ) 和储量 (Tg)

Table 4 SOC density ( $\text{kg m}^{-2}$ ) and SOC storage (Tg) in different administrative areas of Fujian Province relative to mapping scale of the soil map

行政区域 Administrative region	1 : 50 000		1 : 200 000		1 : 500 000		1 : 1 000 000		1 : 4 000 000		1 : 10 000 000	
	密度 Density	储量 Storage	密度 Density	储量 Storage								
0 ~ 20 cm												
福州 Fuzhou	3.82	45.50	4.55	53.51	3.65	43.61	3.81	42.91	5.12	55.67	4.37	48.86
龙岩 Longyan	5.44	102.70	6.43	121.04	5.64	107.24	5.31	101.19	5.52	105.01	5.18	98.66
南平 Nanping	5.41	141.08	6.66	172.58	5.53	144.81	5.39	141.52	5.87	153.67	5.68	149.46
宁德 Ningde	4.29	54.97	4.58	59.56	4.46	59.25	4.35	55.69	5.51	67.68	4.97	63.01
莆田 Putian	3.89	14.35	3.41	12.50	3.51	14.15	3.23	12.30	3.75	13.63	3.31	12.16
泉州 Quanzhou	3.50	38.14	3.63	40.00	3.44	38.53	3.45	38.12	4.14	44.67	3.63	39.67
三明 Sanming	4.97	112.94	5.73	129.54	5.35	122.12	4.97	113.63	5.46	125.32	5.56	127.56
厦门 Xiamen	3.03	4.16	3.83	5.26	2.88	4.54	2.59	3.89	3.01	4.14	2.32	3.34
漳州 Zhangzhou	3.08	38.43	3.46	42.95	3.08	38.97	3.16	39.32	3.62	43.92	2.46	30.46
0 ~ 100 cm												
福州 Fuzhou	9.14	108.85	11.44	134.50	8.35	100.03	9.61	108.23	12.81	139.29	11.83	132.25
龙岩 Longyan	12.28	231.69	12.76	240.01	11.41	217.40	12.23	232.80	13.24	251.84	13.00	247.29
南平 Nanping	15.05	392.41	17.23	446.41	15.58	352.72	13.84	363.45	14.86	388.97	15.60	410.10
宁德 Ningde	11.44	146.42	11.38	148.13	10.58	141.04	11.92	152.74	12.59	154.55	13.16	166.81
莆田 Putian	8.33	30.74	7.53	27.64	8.39	33.86	9.52	36.22	10.68	38.80	9.75	35.81
泉州 Quanzhou	8.47	92.44	8.29	91.23	8.68	97.55	9.34	103.09	10.59	114.30	10.40	113.76
三明 Sanming	12.16	276.07	13.06	295.46	11.38	259.86	12.15	277.63	12.88	295.45	14.01	321.67
厦门 Xiamen	7.84	10.75	6.97	9.56	6.81	10.86	6.74	10.13	8.88	12.23	9.02	12.98
漳州 Zhangzhou	8.55	106.82	8.78	109.05	8.52	108.12	8.87	110.49	9.28	112.44	7.37	91.17

### 3 结 论

明确不同制图尺度土壤数据库是正确估算亚热带土壤有机碳储量，实施“固碳减排”国家战略的

基础。从整个福建省来看，1：100万尺度下估算的表层（0~20 cm）和剖面（0~100 cm）土壤有机碳密度及储量与目前大区域数据最详细的1：5万尺度相对偏差比较小，分别为0.67%和0.82%；而

1:20万尺度相对偏差比较大,分别达到15.57%和15.34%。目前,1:100万尺度是国家有机碳估算中使用最为广泛的比例尺,本研究一定程度上也证明了该尺度在国家级别土壤有机碳研究应用中的可靠性。从不同土壤类型来看,粗骨土受到制图比例尺影响最大,1:50万尺度下表层和剖面土壤有机碳密度及储量的相对偏差分别达到273.24%、 $8.88 \times 10^5\%$ 和241.72%、 $8.13 \times 10^5\%$ ;面积最大的红壤有机碳密度相对偏差在表层土壤下1:100万尺度最小,为4.28%,而在剖面土壤下1:50万最低,仅为1.53%。从不同行政区来看,除厦门市外,其他地级市表层和剖面土壤有机碳密度的相对偏差均在1:50万尺度下最低,这说明各地级市在缺乏精确土壤数据库的情况下,可使用该尺度进行有机碳储量估算和农业管理措施的制定。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 ( 7 ) : 1623—1627
- [ 2 ] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全. *地球科学进展*, 2005, 20 ( 4 ) : 384—393  
Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security ( In Chinese ). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 ( 4 ) : 384—393
- [ 3 ] Pan G X, Lu H F, Li L Q. et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management. *Advance in Earth Sciences*, 2015, 30 ( 8 ) : 940—951
- [ 4 ] Eswaran H. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192—194
- [ 5 ] Martín J A R, Álvaro-Fuentes J, Gonzalo J, et al. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 2016, 264: 117—125
- [ 6 ] Veronesi F, Corstanje R, Mayr T. Landscape scale estimation of soil carbon stock using 3D modelling. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 578—586
- [ 7 ] Dorji T, Odeh I O A, Field D J, et al. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas. *Forest Ecology and Management*, 2014, 318: 91—102
- [ 8 ] 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. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 13—22
- [ 9 ] 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. *应用生态学报*, 2005, 16 ( 12 ) : 2279—2283  
Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1 000 000 soil database ( In Chinese ). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 ( 12 ) : 2279—2283
- [ 10 ] Zhi J J, Jing C W, Lin S P, et al. Estimates of soil organic carbon stocks in Zhejiang Province of China based on 1:50 000 soil database using the PKB method. *Pedosphere*, 2015, 25 ( 1 ) : 12—24
- [ 11 ] 李晓迪, 王淑民, 张黎明, 等. 土壤数据源和制图比例尺对旱地土壤有机碳储量估算的影响. *土壤学报*, 2016, 53 ( 1 ) : 58—71  
Li X D, Wang S M, Zhang L M, et al. Impacts of source of soil data and scale of mapping on assessment of organic carbon storage in upland soil ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 1 ) : 58—71
- [ 12 ] 张勇. 滇黔桂地区土壤有机碳空间表征的尺度效应研究. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2008  
Zhang Y. Effect scale of soil organic carbon spatial characterization in China area ( In Chinese ). Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2008
- [ 13 ] 梁二, 蔡典雄, 张丁辰, 等. 中国陆地土壤有机碳储量估算及其不确定性分析. *中国土壤与肥料*, 2010 ( 6 ) : 75—79  
Liang E, Cai D X, Zhang D C, et al. Terrestrial soil organic carbon storage in China: Estimates and uncertainty ( In Chinese ). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010 ( 6 ) : 75—79
- [ 14 ] 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. *土壤学报*, 2004, 41 ( 1 ) : 35—43  
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 ( 1 ) : 35—43
- [ 15 ] 李加加. 苏北旱地土壤有机碳估算的尺度效应研究. 福州: 福建农林大学, 2013: 14—22  
Li J J. Scale effect of soil organic carbon estimation in the uplands of north Jiangsu Province, China ( In Chinese ). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry

- University, 2013: 14—22
- [ 16 ] 黄琳斌. 旱地有机碳情景分析模拟的尺度效应及其影响因素研究. 福州: 福建农林大学, 2016  
Huang L B. Study on scale effect and its influencing factors in the scenario of simulating soil organic carbon dynamics in the upland ( In Chinese ). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016
- [ 17 ] 王义祥, 翁伯琦. 福建省土壤有机碳密度和储量的估算. 福建农业学报, 2005, 20 ( 1 ): 42—45  
Wang Y X, Weng B Q. Estimate of soil organic carbon density and its stock in Fujian Province ( In Chinese ). Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 20 ( 1 ): 42—45
- [ 18 ] 福建省环境保护厅. 2015年福建省环境状况公报. 2016-05. <http://www.fjepb.gov.cn/zwgk/kjjc/hjzl/qshjzkgb/201606/P020160603649157645861.pdf>  
Fujian Provincial Department of Environmental Protection. Bulletin of the environmental situation of Fujian Province in 2015 ( In Chinese ). 2016-05. <http://www.fjepb.gov.cn/zwgk/kjjc/hjzl/qshjzkgb/201606/P020160603649157645861.pdf>
- [ 19 ] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤. 福州: 福建科学技术出版社, 1991: 287—289  
Soil Survey Office of Fujian Province. Fujian soil ( In Chinese ). Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1991: 287—289
- [ 20 ] Pan G X, Li L Q, Zhang Q, et al. Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu Province, China, and the recent trend of carbon sequestration. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17 ( 1 ): 1—7
- [ 21 ] 袁芳, 赵小敏, 乐丽红, 等. 江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征. 生态环境, 2008, 17 ( 1 ): 268—272  
Yuan F, Zhao X M, Le L H, et al. Organic carbon reserves of tops oil and spatial distribution in Jiangxi province ( In Chinese ). Ecology and Environment, 2008, 17 ( 1 ): 268—272
- [ 22 ] 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
- [ 23 ] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s—1980s. Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology, 2003, 55 ( 2 ): 416—427
- [ 24 ] 李昕, 张明明. SPSS 22. 0 统计分析从入门到精通. 北京: 电子工业出版社, 2015  
Li X, Zhang M M. SPSS 22. 0 Statistical analysis from entry to mastery ( In Chinese ). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015
- [ 25 ] 渠开跃, 冯慧敏, 代力民, 等. 辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究. 土壤通报, 2009, 40 ( 6 ): 1316—1320  
Qu K Y, Feng H M, Dai L M, et al. Profile distribution and storage of soil organic carbon of main forest types in eastern mountainous region of Liaoning ( In Chinese ). Chinese journal of soil science, 2009, 40 ( 6 ): 1316—1320.
- [ 26 ] 王彩霞, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 不同耕作措施对(土委)土土壤有机碳形态及活性的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28 ( 6 ): 58—63  
Wang C X, Yue X J, Ge X Z, et al. Effect of different cultivation measures on activity and bound forms of organic carbon in Lou Soil ( In Chinese ). Agricultural Research in the Arid Area, 2010, 28 ( 6 ): 58—63.
- [ 27 ] 黄玉麟, 郭治兴, 吴志峰, 等. 土壤有机碳储量结果精度分析——以广东省为例. 中国农学通报, 2014, 30 ( 17 ): 300—307  
Huang Y L, Guo Z X, Wu Z F, et al. Accuracy analysis of soil organic carbon—A case study of Guangdong Province, China ( In Chinese ). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30 ( 17 ): 300—307
- [ 28 ] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究. 地理科学, 2014, 34 ( 10 ): 1247—1253  
Chen X. Estimation of soil organic carbon reserves in Guangxi and comparion study with some provinces in China ( In Chinese ). Scientia Geographica Sinica, 2014, 30 ( 10 ): 1247—1253
- [ 29 ] 陈丽娜. 武夷山山地草甸土成土因素分析. 辽宁师专学报(自然科学版), 2005, 7 ( 3 ): 91—92  
Chen L N. Analysis of soil factors of mountain meadow soil in Wuyishan ( In Chinese ). Journal of Liaoning Teachers College ( Natural Science Edition ), 2005, 7 ( 3 ): 91—92
- [ 30 ] 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. 土壤学报, 2016, 53 ( 5 ): 1097—1106  
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 ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 ( 5 ): 1097—1106
- [ 31 ] 曹樱子, 王小丹. 藏北高寒草原样带土壤有机碳分布及其影响因素. 生态环境学报, 2012, 21 ( 2 ): 213—219  
Cao Y Z, Wang X D. Spatial distribution of soil

- organic carbon and influencing factors in the alpine steppe of northern Tibet (In Chinese). *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21 (2): 213—219
- [ 32 ] 邢世和, 张黎明, 周碧青. 福建农用地利用区划. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012
- Xing S H, Zhang L M, Zhou B Q. Regionalization of agricultural land use in Fujian (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012
- [ 33 ] Raffy M. Change of scale theory: A capital challenge for space observation of earth. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (12): 2353—2357

## Scale Effects of Estimation of Soil Organic Carbon Storage in Fujian Province, China

CHEN Zhongxing<sup>1, 2</sup> ZHANG Nan<sup>1, 2</sup> ZHANG Liming<sup>1, 2†</sup> YUAN Ping<sup>1, 2</sup> YAO Caiyan<sup>1, 2</sup>

XING Shihe<sup>1, 2</sup> QIU Longxia<sup>1, 2</sup> CHEN Hanyue<sup>1, 2</sup> FAN Xieyu<sup>1, 2</sup>

(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)

**Abstract** 【Objective】 Soil organic carbon (SOC) is an important part of the terrestrial carbon pool. Owing to its critical role in the global carbon cycle and its heavy storage in the terrestrial ecosystem, any slight change in the SOC pool would sure create certain influence on global climate. So, in order to simulate the global carbon cycle and design agricultural management measures, it is essential to estimate soil organic carbon storage (SOCS) accurately. Because of the spatial heterogeneity of soil properties, the study on SOC estimation on a regional scale may help improve accuracy of the estimation of SOC on the global scale, and moreover provide eco-environmental protection, regional decision-making and agricultural sustainable development with data support. 【Method】 In this study, based on the soil database of Fujian Province, and soil maps of the province, different in scale (1 : 50 000, 1 : 200 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000, 1 : 4 000 000 and 1 : 10 000 000), SOCS were estimated for analysis of spatial distribution of SOC in the surface soil layer (0~20 cm) and soil profile (0~100 cm). The PKB method, i.e., pedological knowledge based method, was used to relate soil spatial data to soil attributes. As affected by the scale of a soil map, the number of soil patches decreased from 247 969 to 46 408, 15 282, 6 343, 440 and 345, with declining mapping scale and 3 082, 3 082, 2 718, 2 547, 1 000 and 890 soil profiles were made available for collection of soil physico-chemical properties, respectively. No doubt, the change in scale of soil mapping would sure bring about uncertainties in estimation of SOCS. 【Result】 Results show that based on the six soil maps different in mapping scale SOC in the surface soil layer (0~20cm) was estimated at 552, 637, 573, 573, 614 and 549 Tg C and in the soil profile (0~100 cm) at 1 396, 1 502, 1 321, 1 395, 1 508 and 1 532 Tg, respectively. Estimation of SOC in skeleton soil, among all the types of soils, was most affected by mapping scale, with relative deviation in the surface soil layer and soil profile being  $8.88 \times 10^5\%$  and  $8.13 \times 10^5\%$ , respectively. However, the estimation of SOC density in the surface soil layer of red soil, the largest in land area, was, the lowest in relative deviation, being 4.28%, based on the soil map 1 : 1 000 000 in scale, while the estimation of SOC density in the soil profile was the lowest in relative deviation, being only 1.53%, based on the soil map, 1 : 500 000 in scale. The estimation of SOCS in Xiamen and Fuzhou, in terms of administrative region, were both affected by mapping scale, with relative deviation being 26.44% for topsoils and 27.97% for soil profiles, respectively. Relative deviations of the estimations of SOC density in the surface soil layer and profile in all the cities, except Xiamen, based on

the soil map 1 : 500 000 in scale, were the lowest. 【 Conclusion 】 In general, regarding Fujian Province as a whole, the estimation of SOC density and storage in the surface soil layer and profile based on the soil map 1 : 1 000 000 in scale deviated the least from the currently available most detailed large-region data, 1 : 50 000 in scale, being 0.67% and 0.82% respectively, while that based on the soil map 1 : 200 000 in scale did more, reaching 15.57% and 15.34% respectively. Estimation of SOCS in the surface soil layer and profile of Skeleton soil, among all the types of soils, was the most affected with relative deviation, reaching up to  $8.88 \times 10^5\%$  and  $8.13 \times 10^5\%$ , respectively. The estimation of SOC density in the surface soil layer of red soil was the lowest in relative deviation, reaching 4.28% based on the soil map 1 : 1 000 000 scale and that in the soil profile of the red soil was, reaching 1.53% based on the soil map 1 : 500 000 in scale. The influence of mapping scale is also significant for Xiamen and Fuzhou. The relative deviation of the estimation of SOCS in the surface soil layer of Xiamen was 26.44%, and in the soil profile of Fuzhou was 27.97%. The relative deviations of the estimations of SOC density in both the surface soil layer and profile in all the cities, except Xiamen based on the soil map 1 : 500 000 in scale, were the lowest. All the findings in the study demonstrate that mapping scales does have certain influences on estimation of SOCS in the soils of the same area. In the case that administrators of an area do not have any accurate soil databases, it is advisable for them to estimate SOCS in their region and design agricultural management measures based on the soil map 1 : 500 000 in mapping scale.

**Key words** Mapping scale; Soil organic carbon density; Soil organic carbon storage; Fujian Province

(责任编辑：檀满枝)