

## 红壤区土壤有机碳时间变异及合理采样点数量研究\*

张忠启<sup>1</sup> 于法展<sup>1</sup> 于东升<sup>2†</sup> 胡 丹<sup>1</sup>

(1 江苏师范大学城市与环境学院, 江苏徐州 221116)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要** 相对于土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)空间变异性及合理采样点数量的研究, 其时间变异性及揭示特定时段SOC变化所需采样点数量的研究较少。选择红壤丘陵区的江西省余江县为研究区, 分析了1982—2007年SOC含量的时间变异特征, 并估算了揭示该时段SOC变化所需土壤采样点数量。结果表明, 1982—2007年SOC含量均值由14.18增至16.27 g kg<sup>-1</sup>, 增幅为14.74%, 其变异系数则由0.22上升为0.44。各土地利用方式中, 水田和林地SOC含量分别增加了2.93和3.12g kg<sup>-1</sup>, 而旱地则降低了2.55 g kg<sup>-1</sup>; 同时各利用方式的SOC含量变异系数均出现较大幅度的提高。基于两时段的全部样点, 在95%和90%置信区间上, 计算得到揭示该时段全县SOC时间变异所需的采样点数量分别为186和147。基于各土地利用方式的SOC变化, 计算得到水田、旱地和林地所需采样点数量分别为68、44和144(95%置信区间)及54、34和112(90%置信区间); 揭示旱地SOC变化所需采样点数量应为水田的60%以上, 而林地所需样点则为水田的2倍以上。该研究结果可为红壤区SOC时间变异性及其调查采样提供参考。

**关键词** 土壤有机碳; 时间变异; 采样点数量; 红壤丘陵区

**中图分类号** S159.2 **文献标识码** A

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)不仅是评价土壤质量的重要指标, 而且其含量高低及变化对全球气候有着重要影响<sup>[1-2]</sup>。由于复杂的自然成土过程, 以及日益增强的人类活动影响, SOC通常不仅存在较强的空间变异性, 而且存在一定的时间变异性<sup>[3-4]</sup>。其中, 区域SOC时间变异性的揭示是评价区域土壤质量演变和土壤固碳效果的前提<sup>[5]</sup>。当前, 通过不同时期的野外土壤调查采样数据是揭示SOC时间变异的主要手段, 然而每次实际野外采样时, 应布设多少采样点一直困扰着土壤学者<sup>[6-7]</sup>。所以区域SOC时间演变及揭示该演变所需合理采样点数量的研究是评估和制定合理农业和

环境管理措施的基础工作。

首先, 由于区域SOC时间演变特征主要是通过不同时期的土壤数据预测得到的区域SOC空间分布图进行叠加分析获得<sup>[8]</sup>。其中高效空间预测方法对获得可靠区域SOC演变特征至关重要。而学者们在区域SOC空间变异性方面的研究开展的较为深入, 相关研究已在不同区域尺度上开展, 包括全球尺度、国家尺度、省级尺度、县域尺度、流域尺度和田块尺度等<sup>[7, 9-12]</sup>。由于不同区域上影响SOC变异的因子存在差异, 学者们针对不同的区域特征发展了不同的空间预测方法, 如多项式法、趋势面法、图斑连接法、反距离加权法及各种克里格

\* 国家自然科学基金项目(41201213, 41571206)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(0812201231)和中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050507)资助。Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41201213, 41571206), the Foundation of State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (No. 0812201231), and the "Strategic Priority Research Program-Climatic Change: Carbon Budget and Related Issues" of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA05050507).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 张忠启(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤资源与环境相关研究。E-mail: zhangzq128@126.com

收稿日期: 2015-10-10; 收到修改稿日期: 2016-01-31; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-03-16

(Kriging)方法等<sup>[13-15]</sup>。这些预测方法的研究为高效揭示区域SOC时间变异提供了可能。

其次,土壤野外调查采样是揭示区域SOC变异性的关键环节,但当前土壤调查时采样点数量的确定还存在一定的主观性。采样点数量的多少不仅关系到SOC变异性的揭示程度,也关系到相关研究成本。区域SOC既有空间上的变异,也存在时间上的变异,当前一些学者已经对特定区域空间上合理采样点数量开展了较多研究,如张世熔<sup>[16]</sup>、Yan和Cai<sup>[17]</sup>、Sun<sup>[18]</sup>、苏晓燕等<sup>[19]</sup>。但这些估算多是基于同一时期、在不同的空间尺度开展研究。然而,区域SOC经过特定时段后通常会有一定幅度的变化,若要揭示区域SOC时间变异需要多少采样点为宜?目前针对这一问题的研究还较少,需要作进一步深入探讨。

中国南方红壤丘陵区地形复杂,土壤类型和土地利用方式多变,SOC不仅在空间上有较强的变异性,而且随着该地区土地利用方式和管理措施出现较大变化,SOC在时间尺度上也呈现较强的变异性。掌握该地区SOC的时间变化特征及揭示其时间变异所需的合理采样点数量,对高效揭示区域SOC时间演变趋势及区域农业管理措施评价具有重要意义。鉴于此,本研究选择红壤区的江西省余江县为研究区,通过不同时间段的土壤采样数据和高效空间预测方法,揭示红壤区SOC时间演变特征,并在此基础上确定揭示该时段县域SOC变化所需的合理采样点数量,为该地区SOC时间变异研究及土壤野外调查提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

余江县为江西省东北丘陵山区向鄱阳湖平原过渡区域,地处 $116^{\circ}41' \sim 117^{\circ}09'E$ , $28^{\circ}04' \sim 28^{\circ}37'N$ ,总面积为 $927\text{km}^2$ 。该地区气候温和,光热充足,属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,年平均温度 $17.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量 $1758\text{mm}$ 。地形以低丘为主,南北多高丘,丘陵面积占78%,平原占22%<sup>[20]</sup>。成土母质有红砂岩、第四纪红色黏土、页岩和河流冲积物等(江西省余江县土壤普查办公室,1986)。土壤类型以红壤和水稻土为主,约占全县总面积的90%以上,潮土亦有零星分布。

土地利用方式以水田、旱地、林地为主,三种土地利用方式分别占总面积的39%、13%和38%(中国土地利用数据库,2005)。该地区主要作物有水稻、花生、红薯、芝麻和油菜等。

### 1.2 数据来源

1982年SOC含量数据源自余江县全国第二次土壤普查结果。由于此次调查采样点位置没有经纬度信息,因此根据采样时记录的以重要地物为参照的位置信息及采样点周围的环境因子信息确定其空间位置,共选用可确定空间位置的表层(0~20cm)样点252个(图1)。其中174个作为预测样点,按土地利用方式分为水田、旱地和林地,样点数量分别为120、26和28个;其余78个样点作为验证点用以评价SOC空间预测的不确定性,该样点包含了三种主要利用方式。

2007年SOC数据源自中国科学院耕地土壤质量分等定级与生产潜力评估(2007年—2010年)项目在余江县的高密度采样。本研究通过 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 网格从高密度采样点中重采样得到表层(0~20cm)土壤样品253个(图1),水田、旱地和林地3种类型样点数分别为173、39和41个。此外,随机均匀地选取78个土壤采样点作为验证样点,用以评价SOC空间预测的不确定性,该样点也包含了三种主要土地利用方式。

两期土壤样品的有机质均采用重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )氧化—滴定法测定<sup>[21]</sup>,有机质含量乘以0.58(Bemmelen转换系数)得到各样点的SOC含量。

### 1.3 SOC时间变异的预测

合理空间预测方法的选择是进行SOC时间变异研究的基础。中国南方红壤丘陵区SOC受到多种因素的制约,并存在较强的空间变异性。已有研究表明,随着人类活动对SOC空间分布的影响日益增强,土地利用方式成为制约该地区SOC变异性的主导因子,这一结论已被很多学者研究结果证实<sup>[22-23]</sup>。为提高空间预测精度,本研究使用了经过多次验证的红壤区高效SOC空间预测方法—结合土地利用类型信息的克里格方法得到两时段SOC含量空间分布图,关于该预测方法的原理可参阅相关文献<sup>[24-25]</sup>;1982年—2007年的SOC时间演变则通过两时段SOC含量空间分布图进行栅格叠加运算得到。

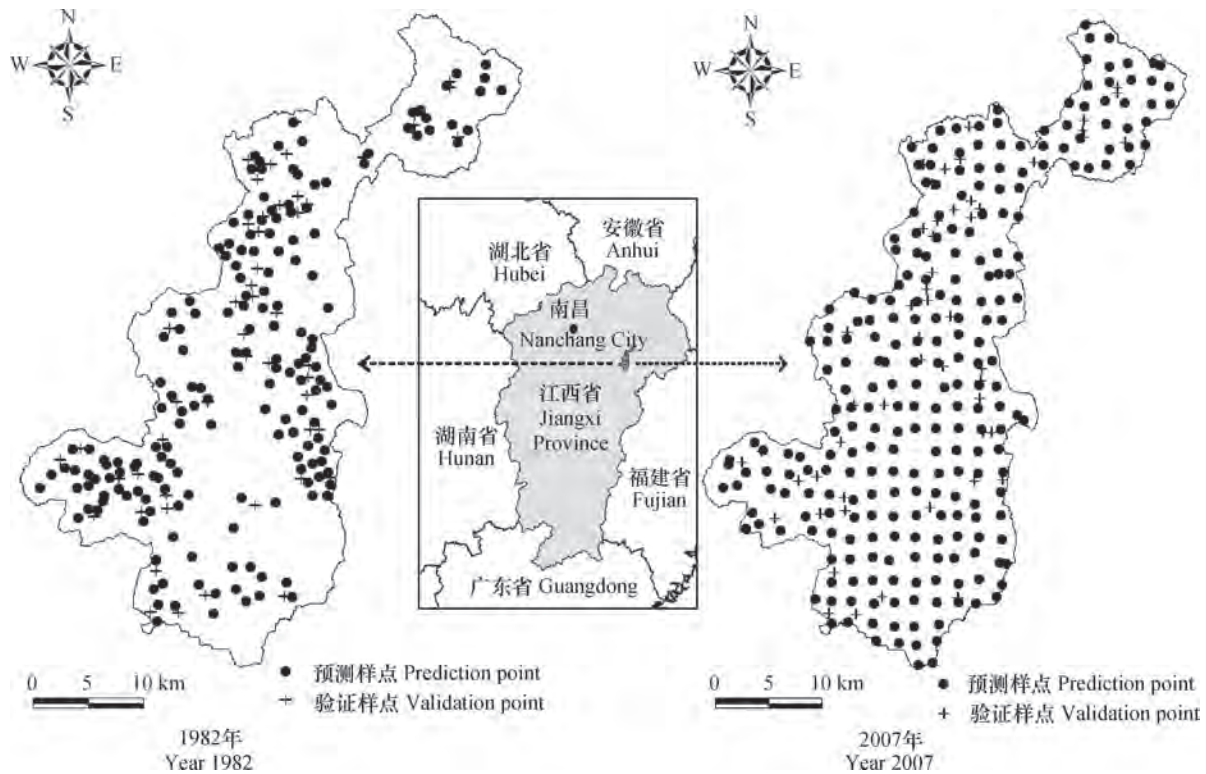


图1 研究区位置与土壤采样点分布图

Fig. 1 Study area location and distribution of sampling points

#### 1.4 预测结果的不确定性评价

1982年和2007年两时段的SOC预测精度分别通过验证点的SOC实测与预测值求得的均方根误差 (RMSE) (式(1)) 进行评价。RMSE越小, 精度越高, 反之精度越低。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_{oi} - x_{pi})^2} \quad (1)$$

式中,  $N$ 为验证点数量,  $x_{oi}$ 为验证点实测值,  $x_{pi}$ 为验证点预测值。

#### 1.5 合理采样点数量估算

在估算1982年—2007年SOC变化所需的合理采样点数量时, 使用了基于区域随机变量且国际上较为认可的估算公式进行计算<sup>[7]</sup>。

$$n^{1/2} = \sqrt{2} \times (Z_\alpha + Z_\beta) \times CV \times \mu / \Delta \quad (2)$$

式中,  $n$ 为所需的土壤采样点数量,  $\Delta$ 为1982年—2007年SOC平均变化量,  $CV$ 和 $\mu$ 分别表示采样点的SOC变异系数和均值,  $Z_\alpha$ 和 $Z_\beta$ 为由Z值表查得的相应临界值。

#### 1.6 数据统计分析

SOC含量数据及其残差的统计分析使用SPSS 16.0, 半方差函数及理论模型拟合利用地统计学

软件GS+ 7.0, 空间插值图在ArcGIS 9.3下完成, 合理采样点数量与SOC变幅之间的量化曲线在MATLAB7.1下完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同时期的SOC含量统计特征

1982年和2007年研究区SOC含量的描述统计见表1。1982年全县SOC含量均值为 $14.18 \text{ g kg}^{-1}$ , 最小值和最大值分别为 $5.86$ 和 $22.78 \text{ g kg}^{-1}$ , 后者是前者的近4倍。三种土地利用方式中, 水田的SOC含量最高 ( $15.10 \text{ g kg}^{-1}$ ), 旱地SOC最低 ( $11.62 \text{ g kg}^{-1}$ ), 林地居于两者之间, 检验表明水田与旱地、林地差异显著 ( $p < 0.05$ )。2007年SOC含量均值为 $16.27 \text{ g kg}^{-1}$ , 最小值和最大值分别为 $3.11$ 和 $36.40 \text{ g kg}^{-1}$ , 后者约为前者的10多倍。在各种土地利用方式中, 依然是水田SOC含量最高, 旱地最低; 水田、旱地和林地三者之间SOC含量呈现显著差异 ( $p < 0.05$ )。相比于1982年, 水田和林地出现了较大幅度提高, 而旱地出现一定程度的下降, 而各利用方式的SOC含量变异系数则均呈现大幅提高, 这些变化与近年来各利用方式相应的管理措

表1 1982和2007年SOC含量的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of SOC contents in Year 1982 and 2007

| 年份<br>Year         | 土地利用<br>Land use  | 样点数<br>Sample size | 最小值<br>Minimum | 最大值<br>Maximum | 均值<br>Mean           | 标准差<br>Standard deviation | 变异系数<br>Coefficient of variation | 1982—2007 SOC   |
|--------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------|---|
|                    |                   |                    |                |                |                      |                           |                                  | 变化量<br>SOC variation in<br>1982—2007<br>(g kg <sup>-1</sup> ) |
| 1982年<br>Year 1982 | 水田<br>Paddy field | 120                | 7.02           | 22.78          | 15.10a <sup>1)</sup> | 2.41                      | 0.16                             |   |
|                    | 旱地<br>Dry land    | 26                 | 5.86           | 17.40          | 11.62b               | 3.17                      | 0.27                             |   |
|                    | 林地<br>Forest land | 28                 | 5.88           | 18.73          | 12.63b               | 4.21                      | 0.33                             |   |
|                    | 总体<br>Total       | 174                | 5.86           | 22.78          | 14.18                | 3.19                      | 0.22                             |   |
| 2007年<br>Year 2007 | 水田<br>Paddy field | 173                | 5.00           | 34.20          | 18.02A               | 6.07                      | 0.34                             | +2.93   |
|                    | 旱地<br>Dry land    | 39                 | 3.42           | 17.41          | 9.07C                | 4.16                      | 0.46                             | -2.55   |
|                    | 林地<br>Forest land | 41                 | 3.11           | 34.03          | 15.75B               | 9.21                      | 0.58                             | +3.12   |
|                    | 总体<br>Total       | 253                | 3.11           | 34.20          | 16.27                | 7.17                      | 0.44                             | +2.09   |

注：1) 不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Figure in the bracket is that different letters represent significant difference ( $p < 0.05$ )

施及其变化密切相关。同时，SOC含量变异系数由1982年的0.22增加至2007年的0.44，增加了1倍左右，表明2007年区域SOC含量的波动性较1982年大幅提高。

## 2.2 不同时期SOC数据的空间结构特征

利用SOC残差数据（去除土地利用方式均值后得到）进行空间插值时，为了避免在计算变异函数时产生比例效应而增大估计误差，要求数据符合正态分布，不满足正态分布的需进行相应的转换。在本研究中对1982年和2007年SOC含量残差数据分别进行Kolmogorov-Smirnov检验，结果表明SOC残差数据均服从正态分布（图2）。

1982年和2007年SOC残差值的半方差函数拟合模型见图3。可以看出，两时段残差数据的半方差函数最优拟合模型均为指数函数，模型公式表明两时段半方差函数的块金值分别为0.301和0.352，1982年和2007年拟合模型的块金值与基台值之比（C/sill）分别为0.400和0.335，均属于中等强度空

间自相关，这与其他学者在红壤区研究得到的SOC空间自相关性基本一致<sup>[26]</sup>。两时段残差数据的空间自相关距离分别为5880m和5130m，均大于采样点的平均采样距离，表明采样点密度可以满足揭示SOC空间变异的需要。

## 2.3 SOC时间变异特征

1982年和2007年SOC含量空间分布如图4所示。可以看出两时段SOC在空间分布上出现了较大差异。从图4a来看，1982年SOC分布格局呈现中部和南部沿河地区SOC含量较高，而其他地区SOC含量整体较低。SOC含量较高的地区主要为沿河流的水田地区，而林地和旱地整体SOC含量较低。而从图4b来看，2007年SOC空间分布特征为北部地区和西南部地区含量较高，而中东部地区的SOC含量较低。SOC含量较高的地区主要是北部山区林地和沟谷水田，含量较低的地区主要以旱地分布为主。可见，SOC含量的空间分布特征与红壤区土地利用方式的分布密切相关。整体来看，由于水田的农业投

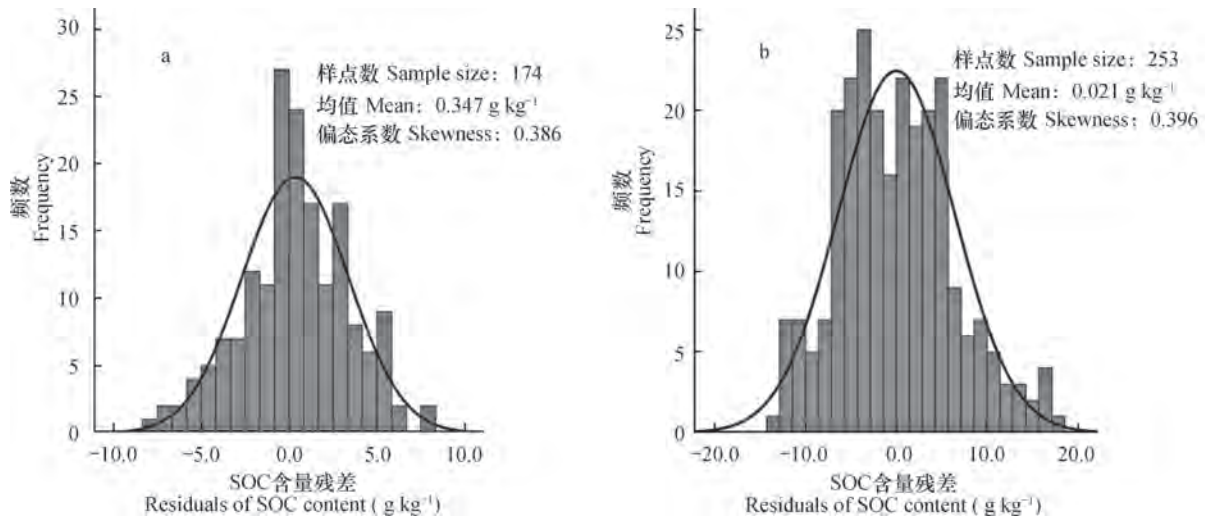


图2 1982 (a) 和2007年 (b) SOC残差数据频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of SOC residual data in Year 1982 (a) and 2007 (b)

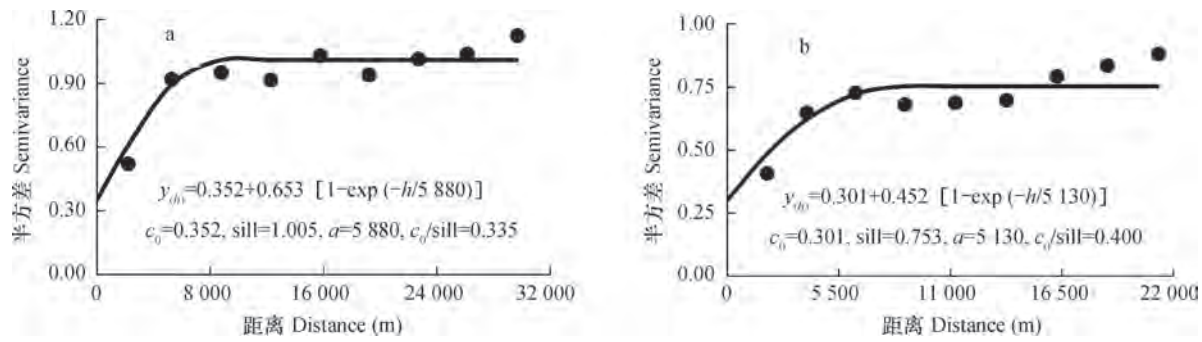


图3 1982年 (a) 和2007年 (b) SOC残差数据半方差函数

Fig. 3 Semi-variograms of SOC residual data in Year 1982 (a) and 2007 (b)

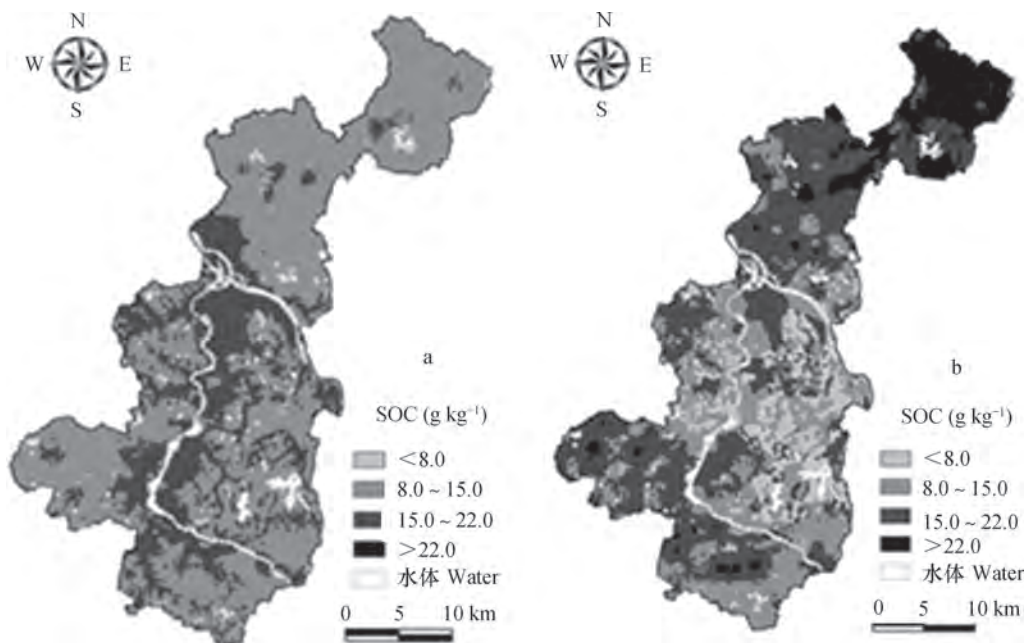


图4 1982年 (a) 和2007年 (b) 土壤有机碳空间分布图

Fig. 4 Distribution maps of SOC content in Year 1982 (a) and 2007 (b)

<http://pedologica.issas.ac.cn>

人及秸秆还田量较多,加上长期淹水条件使有机质分解速度缓慢而有利于SOC的积累,故其SOC含量较高。而旱地的土壤水、气条件有利于土壤养分的分解,加上农业投入和秸秆还田量相对较少,土壤养分得不到及时补充,导致其SOC含量明显低于水田。这与很多学者的研究结果较为一致<sup>[27-28]</sup>。而对于林地,由于不同时期采取的林地保育措施不同,导致了1982年和2007年的林地SOC含量出现较大差异。

从研究区SOC含量空间预测RMSE来看,1982年和2007年全部验证样点的预测RMSE分别为3.29和4.26 g kg<sup>-1</sup>,分别占到预测样点均值的23.2%和26.2%(表1)。而从各种土地利用方式来看,水田的预测误差最小,1982年和2007年的预测RMSE分别为2.37和3.29 g kg<sup>-1</sup>,分别占两时段水田均值的21.8%和18.25%;林地的预测误差最大,分别为4.05和6.21 g kg<sup>-1</sup>,分别占两时段林地均值的32.1%和39.9%;旱地预测RMSE居于两者之间,分别为3.66和4.35 g kg<sup>-1</sup>,分别占两时段旱地均值的31.49%和48.0%。各利用方式的预测误差大小与其SOC含量变异性的强弱存在较大关系,水田的SOC含量变异性最小,其预测RMSE最小,而林地SOC含量变异性最大,其相应的预测RMSE值也最大。同时也说明了由于近些年各土地利用方式内土壤管理措施的一致程度出现分化,造成了相同土地利用方式在两时段SOC预测精度出现差异。

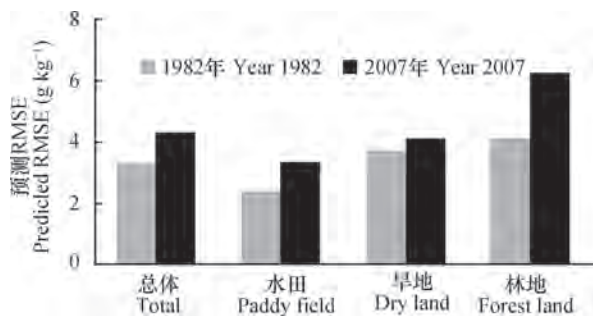


图5 1982年和2007年验证点的预测误差

Fig. 5 Predictive errors with validation samples in Year 1982 and 2007

通过两期数据预测结果进行栅格叠加运算,得到研究区SOC含量演变结果(图6)。可以看出研究区北部和西南部地区SOC含量呈现大幅增加,而中东部地区则出现明显的下降趋势。北部和西南部山区是主要林地分布区,由于20世纪90年代之前林地大面积开垦为坡耕地(多为旱地),使其

SOC含量大为降低,导致1982年林地SOC含量整体较低。而90年代以后由于实施退耕还林和封山育林措施,因此近些年植被覆盖度大为增加,林地土层发育深厚,地表枯枝落叶腐烂后进入土壤进而增加其SOC含量,这与其他学者在红壤区的研究结果一致<sup>[29]</sup>;同时该地区山间沟谷多为水田,由于人均水田面积较小,农业投入相对其他地区多,导致北部和西南部山区SOC含量整体较高。中东部地区旱地较多,由于旱地收益较差,管理方式落后,甚至出现大面积弃荒,导致近些年旱地SOC含量多呈现连续降低趋势。研究表明,自1982年以来,林地和水田土壤管理措施使其SOC含量呈增加趋势,成为土壤固碳的主要类型区;旱地SOC呈降低趋势而成为碳源,应在制定固碳措施时引起重视。

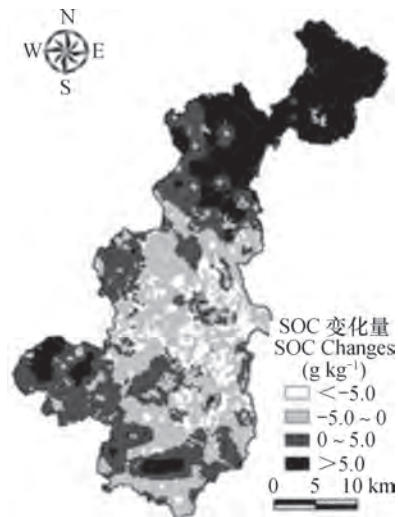


图6 1982—2007年SOC含量演变图

Fig. 6 Evolving map of SOC content from Year 1982 to 2007

#### 2.4 揭示SOC变化所需采样点数量

两时段SOC含量的对比发现,2007年全部样点SOC含量较1982年增加了2.09 g kg<sup>-1</sup>,增加幅度为14.7%。各土地利用方式中,水田和林地SOC含量分别增加了2.93和3.12 g kg<sup>-1</sup>,分别较1982年增加了19.4%和24.7%,而旱地则降低了2.55 g kg<sup>-1</sup>,降幅为21.9%。基于式(5)和不同置信区间计算了为揭示SOC含量变化所需的合理采样点数量如图7和图8所示。

由图7可知,在95%置信水平上为揭示1982—2007年余江县SOC含量变化需要186个土壤采样点。而为了揭示各种土地利用方式SOC变化,水田、旱地和林地分别需要68、44、144个采样点,

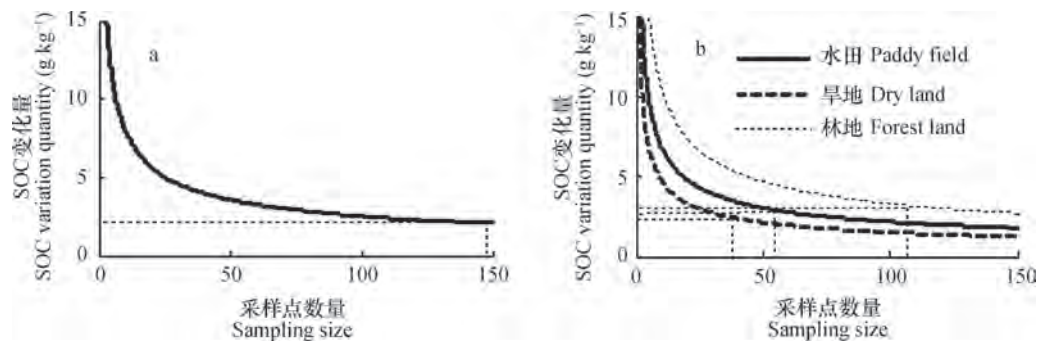


图7 研究区 (a) 和各利用方式 (b) 的SOC变幅与所需样点的量化关系 (95%置信水平)

Fig. 7 Relations between SOC variable amplitudes with required samples based on all sampling points (a) and various land-use samples (b) (95% confidence level)

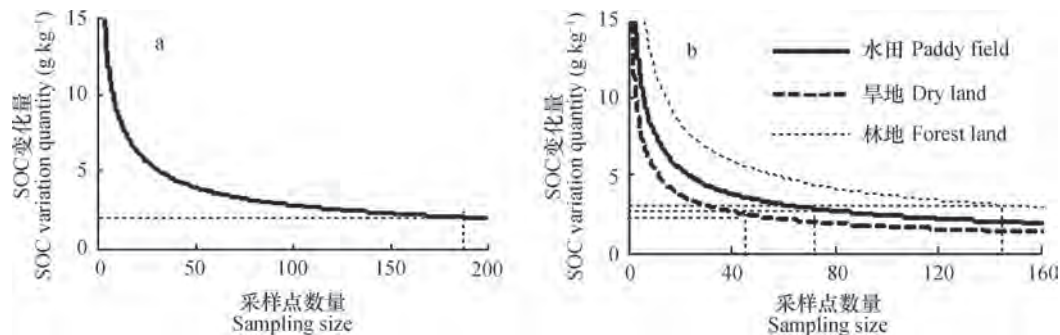


图8 研究区 (a) 和各利用方式 (b) 的SOC变幅与所需样点的量化关系 (90%置信水平)

Fig. 8 Relations between SOC variable amplitudes with required samples based on all sampling points (a) and various land-use samples (b) (90% confidence level)

三者的比例为1 : 0.65 : 2.12。而在90%置信水平上，揭示全县SOC变化需要147个土壤采样点；而为了揭示各种土地利用方式SOC变化，水田、旱地和林地则分别需要54、34和112个采样点，三者比例为1 : 0.63 : 2.07。研究表明，为较好地揭示自第二次土壤普查以来区域SOC的整体变化，全县范围至少应布设186（95%置信水平）和147个（90%置信水平）采样点；若需揭示不同土地利用方式SOC变化而进行样点布设时，旱地所需样点数量应为水田的60%以上，而林地采样点数量应为水田的2倍以上。从1982年和2007年全县和不同土地利用方式采样点来看，其采样点的布设并不尽合理，水田样点偏多，而林地、旱地样点数量偏少，这对高效揭示两时期的SOC空间分布及时间演变均有一定影响。研究表明，在确定揭示区域SOC时间变异所需的采样点数量时，需考虑区域SOC整体变幅及其变异性大小，进而估算区域所需的总样点数量；而考虑到各土地利用方式间的差异时，则需考虑各利用方式的SOC变幅及其变异性大小，并据此估算

出各利用方式的合理采样点数量及其之间的比例关系。本研究结果将对红壤区SOC野外调查采样方案的制订提供有效参考。

### 3 结 论

对研究区1982年和2007年两时段SOC数据的统计分析表明，第二次土壤普查以来余江县SOC平均含量整体呈增加趋势，但由于各土地利用方式的管理措施不同，导致各方式间的SOC时间变异存在差异，其中林地和水田SOC含量均呈增加趋势，而旱地则呈降低趋势。基于SOC变化量和变异系数，估算了揭示全县SOC时间变异所需的采样点数量分别为186（95%置信水平）和147（90%置信水平），低于本研究2007年2 km × 2 km网格采样点数量，说明在通过调查采样揭示研究区SOC时间变异时，采样间距可适当大于2 km；从各土地利用方式所需采样点计算结果来看，林地所需采样点最多，其次是水田，而旱地最少；通过与2007年网格采样的对

比来看, 网格采样得到的各利用方式的样点数量比例并不合理, 会对揭示区域SOC时间变异产生影响, 这也说明进行土壤样点布设时充分考虑各土地利用方式的SOC变幅及其变异系数大小是十分必要的。

### 参考文献

- [ 1 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123 ( 1/2 ) : 1—22
- [ 2 ] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化. 气候变化研究进展, 2008, 4 ( 5 ) : 282—289  
Pan G X. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China ( In Chinese ) . *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4 ( 5 ) : 282—289
- [ 3 ] Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Science China: Life Science*, 2010, 53: 766—775
- [ 4 ] 慈恩, 王莲阁, 丁长欢, 等. 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响. *土壤学报*, 2015, 52 ( 3 ) : 576—586  
Ci E, Wang L G, Ding C H, et al. Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 3 ) : 576—586
- [ 5 ] Darilek J L, Huang B, Wang Z G, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129: 286—292
- [ 6 ] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, et al. Effect of sampling classification patterns on SOC variability in the red soil region, China. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110: 2—7
- [ 7 ] Conant R T, Paustian K. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: Implications for detecting change at different scales. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 127—135
- [ 8 ] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. *Geoderma*, 2007, 139 ( 3/4 ) : 336—345
- [ 9 ] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究. *土壤学报*, 2014, 51 ( 6 ) : 1270—1281  
Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 ( 6 ) : 1270—1281
- [ 10 ] 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: 1000 000 soil database ( In Chinese ) . *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 ( 12 ) : 2279—2283
- [ 11 ] 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
- [ 12 ] 薛志婧, 马露莎, 安韶山, 等. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量. *生态学报*, 2015, 35 ( 9 ) : 2917—2925  
Xue Z J, Ma L S, An S S, et al. Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the Loess Plateau ( In Chinese ) . *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 ( 9 ) : 2917—2925
- [ 13 ] 赵永存, 史学正, 于东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究. *土壤学报*, 2005, 42 ( 3 ) : 379—385  
Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 ( 3 ) : 379—385
- [ 14 ] Kerry R, Oliver M A. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. *Geoderma*, 2007, 140 ( 4 ) : 383—396
- [ 15 ] Kerry R, Goovaerts P, Rawlins B G, et al. Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale. *Geoderma*, 2012, 170 ( 1 ) : 347—358
- [ 16 ] 张世熔, 孙波, 赵其国, 等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44 ( 5 ) : 885—892  
Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in South China ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 ( 5 ) : 885—892
- [ 17 ] Yan X Y, Cai Z C. Number of soil profiles needed to give a reliable overall estimate of soil organic carbon storage using profile carbon density data. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 54 ( 5 ) : 819—825
- [ 18 ] Sun W X, Zhao Y C, Huang B, et al. Effect of sampling density on regional soil organic carbon



- estimation for cultivated soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175: 671—680
- [ 19 ] 苏晓燕, 赵永存, 杨浩, 等. 不同采样点数量下土壤有机质含量空间预测方法对比. *地学前缘*, 2011, 18 ( 6 ) : 34—40  
Su X Y, Zhao Y C, Yang H, et al. Comparison of predictive methods for mapping the spatial distribution of soil organic matter content with different sampling densities ( In Chinese ). *Earth Science Frontiers*, 2011, 18 ( 6 ) : 34—40
- [ 20 ] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. *土壤学报*, 2003, 40 ( 3 ) : 344—352  
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, et al. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 ( 3 ) : 344—352
- [ 21 ] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter // Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison, WI: ASA-SSSA, 1982: 539—559
- [ 22 ] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 等. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31 ( 18 ) : 5358—5371  
Chen C, Lü C H, Fan L, et al. Effects of land use change on soil organic carbon: A review ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 ( 18 ) : 5358—5371
- [ 23 ] 李增强, 赵炳梓, 张佳宝. 土地利用和轮作方式对旱地红壤生化性质的影响. *土壤*, 2014, 46 ( 1 ) : 53—59  
Li Z Q, Zhao B Z, Zhang J B. Effects of land management and crop rotation on upland red soil biochemical properties ( In Chinese ). *Soils*, 2014, 46 ( 1 ) : 53—59
- [ 24 ] Liu T L, Juang K W and Lee D Y. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 ( 4 ) : 1200—1209.
- [ 25 ] 张忠启, 史学正, 于东升, 等. 南方红壤丘陵区土壤有机质和全氮含量的空间预测研究. *生态学报*, 2010, 30 ( 19 ) : 5338—5345  
Zhang Z Q, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial prediction of soil organic matter and total nitrogen in the hilly red soil region, China ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 ( 19 ) : 5338—5345
- [ 26 ] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, et al. Priority selection rating of sampling density and interpolation method for detecting the spatial variability of soil organic carbon in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 ( 5 ) : 2287—2297
- [ 27 ] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响. *中国农业科学*, 2006, 39 ( 4 ) : 750—757  
Wang X L, Su Y R, Huang D Y, et al. Effects of land use on soil organic C and microbial biomass C in hilly red soil region in subtropical China ( In Chinese ). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 ( 4 ) : 750—757
- [ 28 ] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展. *土壤*, 2015, 47 ( 2 ) : 220—228  
Li Z P, Liu M, Jiang C Y. Decomposition, accumulation and distribution of soil organic matter in typical red soil region of China ( In Chinese ). *Soils*, 2015, 47 ( 2 ) : 220—228
- [ 29 ] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性. *土壤学报*, 2015, 52 ( 6 ) : 1336—1344  
Yang W, Zhou J G, Wang M H, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 6 ) : 1336—1344

## Temporal Variability of Soil Organic Carbon and Rational Sample Size in Red Soil Region

ZHANG Zhongqi<sup>1</sup> YU Fazhan<sup>1</sup> YU Dongsheng<sup>2†</sup> HU Dan<sup>1</sup>

( 1 School of Urban and Environmental Sciences, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China )

( 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China )

**Abstract** 【Objective】The knowledge about characteristics of the temporal variation of soil organic carbon ( SOC ) over a region and a rational sample size needed for exposing the temporal variation is of

<http://pedologica.issas.ac.cn>

important significance to the study to reveal tendency of the temporal variation of SOC in a region efficiently and evaluate regional agricultural management practices. So far much has been done on spatial variability of SOC in a region and its rational sample size, while little has been reported on temporal variability of SOC and rational sample size needed to reveal SOC variability in a given time period. **【Method】** To make up the shortage, Yujiang County of Jiangxi Province was selected as study area, and the data of soil sample size in 1982 and 2007 as basis, and then spatial distribution maps of SOC in 1982 and 2007 were plotted by means of Kriging. Through raster overlay operation of the two SOC content maps, characteristics of the temporal variation of SOC content during the period of 1982–2007 were worked out and then used as basis to estimate the number of sampling sites needed to exposit that variation. **【Result】** Results show that the mean SOC content in 1982–2007 increased by from 14.18 to 16.27 g kg<sup>-1</sup> with a growth rate of 14.74%, while its coefficient of variation (CV) rose from 0.22 to 0.44, both demonstrating a large growth. However, SOC content varied with land-use. Among the three main patterns of land-use, paddy fields and forest lands experienced rising in SOC from 15.10 to 18.02 and from 12.63 to 15.75 g kg<sup>-1</sup> or by 19.34% and 24.70%, respectively, during the period of 1982–2007, whereas uplands did oppositely in SOC content, decreasing from 11.62 to 9.07, or by 21.94%. However, in the meantime, the three patterns all had a drastic increase in CV of SOC content. In the light of spatial distribution of the variation of SOC content, the northern and southwestern parts of Yujiang County were on a substantially increasing trend, while the central-eastern part was on a declining trend, which was closely related to spatial distribution of the land use patterns. Based on the data of sample size of the periods, 1982 and 2007, with confidential intervals being 95% and 90%, the rational number of sampling sites required to reveal temporal variability of SOC content in the whole county was calculated to be 186 and 147 for the two years, respectively. And based on the SOC variation in lands different in land use, the rational number of sampling sites for paddy field, dry land, and forest land was figured out to be 68, 44, and 144, respectively, with confidence interval being 95% and 54, 34, and 112, respectively, with confidence interval being 60%. Generally, the sample size for upland should be 60% or over of that for paddy field, while that for forest land should be 2 times or over that for paddy field. By reviewing distributions of the sampling sites in the county and in fields of three different land use, separately, it was found that the distribution of the sampling sites was not so reasonable in 1982 and 2007, that is to say, a bit too many in paddy field and too few in upland and forestland, which no doubt had some adverse effects on efficient revelation of spatial distribution and temporal variation of SOC in the county in the two time periods. **【Conclusion】** The findings of the study indicate that in estimating the number of sampling sites needed for revealing temporal variation of SOC in a region on the whole, it is essential to take into account amplitude and coefficient of the variation of SOC at various sampling sites. In understanding differences between patterns of landuse, it is essential to take into account amplitude and coefficient of the variation of SOC relative to landuse pattern and work out how big a sample size is needed for each landuse pattern and what the ratio should be for the three landuse patterns in sample size. The study is expected to be able to provide some references in exploring temporal variability of SOC and consequently arranging sampling sites for the survey in hilly red soil regions.

**Key words** Soil organic carbon (SOC); Temporal variability; Sampling size; Hilly red soil region

(责任编辑: 檀满枝)