

# 江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究<sup>①</sup>

江叶枫<sup>1,2</sup>, 饶磊<sup>1,2</sup>, 郭熙<sup>1,2\*</sup>, 叶英聪<sup>2</sup>, 孙凯<sup>1,2</sup>, 李婕<sup>1,2</sup>,  
王澜珂<sup>1,2</sup>, 李伟峰<sup>1,2</sup>

(1 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

**摘要:** 准确地获取省域尺度下土壤有机碳空间变异的主控因素对土壤碳调控以及全球环境保护具有重要意义。本文基于江西省 2012 年测土配方施肥项目采集的 16 582 个耕地表层 (0~20 cm) 土壤样点数据, 探讨江西省耕地表层土壤有机碳空间变异的主控因素。运用普通克里格法、单因素方差分析与回归分析方法对比地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型、灌溉能力和秸秆还田方式对江西省土壤有机碳空间分布的影响。结果表明: 江西省土壤有机碳含量在 5.22~40.31 g/kg 之间, 平均值为 17.90 g/kg, 变异系数为 31.01%, 呈中等程度的变异性。经半方差分析, 土壤有机碳的变程为 30.6 km, 空间自相关范围较小; 块金效应值为 12.49%, 表明土壤有机碳空间变异受结构性因素影响大于随机性因素。在空间分布上, 高值区主要分布在萍乡市、新余市、南昌市、抚州市与景德镇市。回归分析与单因素方差分析结果表明, 地形因子、灌溉能力、成土母质、耕地利用方式、土壤类型和秸秆还田方式对土壤有机碳空间变异影响均显著 ( $P<0.05$ ), 但影响程度不一。秸秆还田方式对土壤有机碳空间变异的独立解释能力最高, 为 38.9%, 是江西耕地表层土壤有机碳空间变异的主控因素。

**关键词:** 土壤有机碳; 江西省; 空间变异; 主控因素; 秸秆还田

中图分类号: S153.6 文献标识码: A

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是植物有机养分和矿质养分的主要来源,也是陆地碳库与区域环境的重要组成部分,其含量与动态变化将直接影响着区域环境与全球碳循环<sup>[1-3]</sup>。由于受结构性与随机性因素的影响,土壤有机碳在空间分布上存在一定的异质性,即使在相邻位置,土壤有机碳含量也会因为复杂的环境而产生较大差异<sup>[4-6]</sup>。因此,准确地获取土壤有机碳空间变异的主控因素对土壤碳恢复与累积以及全球环境保护具有重要意义。

土壤有机碳含量的涵养与运移以及分布是复杂的物理、化学与生物过程,受多种因素的共同作用<sup>[7-8]</sup>。目前国内外关于土壤有机碳空间变异的影响因素研究已从定性转变到定量研究的思路中来。如顾成军等<sup>[9]</sup>、胡玉福等<sup>[10]</sup>、罗由林等<sup>[11]</sup>、李婷等<sup>[12]</sup>在影响土壤有机碳定性因素定量化研究方面进行了探索。前人研究表明<sup>[13-14]</sup>,定性因素定量化研究对准确获取土壤有机碳空间变异信息、精确估算土壤碳库、区域资源优化利用以及环境保护方面具有重要作用。但以

往研究大多集中在小流域或县域尺度<sup>[15-18]</sup>,有关省域及省域以上尺度的研究较少<sup>[9]</sup>;且以往的研究中大多围绕结构性因素(如土地利用、土壤类型和地形等)<sup>[6,9-18]</sup>对土壤有机碳空间变异进行探讨,较少考虑随机性因素(如秸秆还田方式、灌溉能力、氮肥施用量等)<sup>[19-23]</sup>。前人研究表明<sup>[8-9,11-21]</sup>,土壤有机碳空间变异受随机性因素与结构性因素的共同作用,充分考虑随机性与结构性因素对分析省域尺度土壤有机碳空间变异的主控因素、掌握与调控土壤有机碳的关键因子以及全球碳循环研究具有重要意义。

江西省地处中国东南部,是南方红壤区典型的农业大省,也是我国粮食输出省份之一。耕地质量关系到粮食安全,土壤有机碳是表征耕地质量的最重要因素之一,对土壤有机碳空间变异的主控因素研究是有效应对粮食安全和农业可持续发展的重要依据<sup>[15,24]</sup>。本研究以江西省为案例区,基于 2012 年测土配方施肥项目采集的 16 582 个耕地表层(0~20 cm)土壤样点数据,运用普通克里格法、单因素方差分析和回归分析方法,结合地

基金项目: 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)资助。

\* 通讯作者(xig435@163.com)

作者简介: 江叶枫(1994—),男,江西余干人,硕士研究生,主要从事土壤养分变异研究。E-mail: jiangyf0308@163.com

形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型、灌溉能力和秸秆还田方式,对江西省土壤有机碳空间变异的主控因素进行研究。以期对江西省耕地土壤碳调控和指导土壤有机碳数字制图方面提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江西省位于中国东南部,地理坐标介于  $24^{\circ}29'14'' \sim 30^{\circ}04'41''N$ ,  $113^{\circ}34'36'' \sim 118^{\circ}28'58''E$ ,土地总面积为  $16.69 \text{ 万 km}^2$ ,人口 4 566 万,辖 11 个地级行

政区、100 个县级行政区、1 个国家级新区。全省气候温暖湿润,四季分明,春秋短而夏冬长。省内东、西、南三面环山,中部丘陵和河谷平原交错分布,北部则为鄱阳湖平原。年平均气温  $16.3 \sim 17.5$ ,年均降水量  $1\,700 \sim 1\,943 \text{ mm}$ ;全年无霜期约  $240 \sim 300 \text{ d}$ ,为亚热带湿润气候。土地利用类型以耕地、林地和园地为主(图 1A),其中耕地面积为  $3.87 \text{ 万 km}^2$ ,占全省土地总面积的  $23.19\%$ 。土壤类型主要有水稻土、红壤、黄褐土和潮土等。植被以常绿阔叶林为主,具有典型的亚热带森林植物群落。

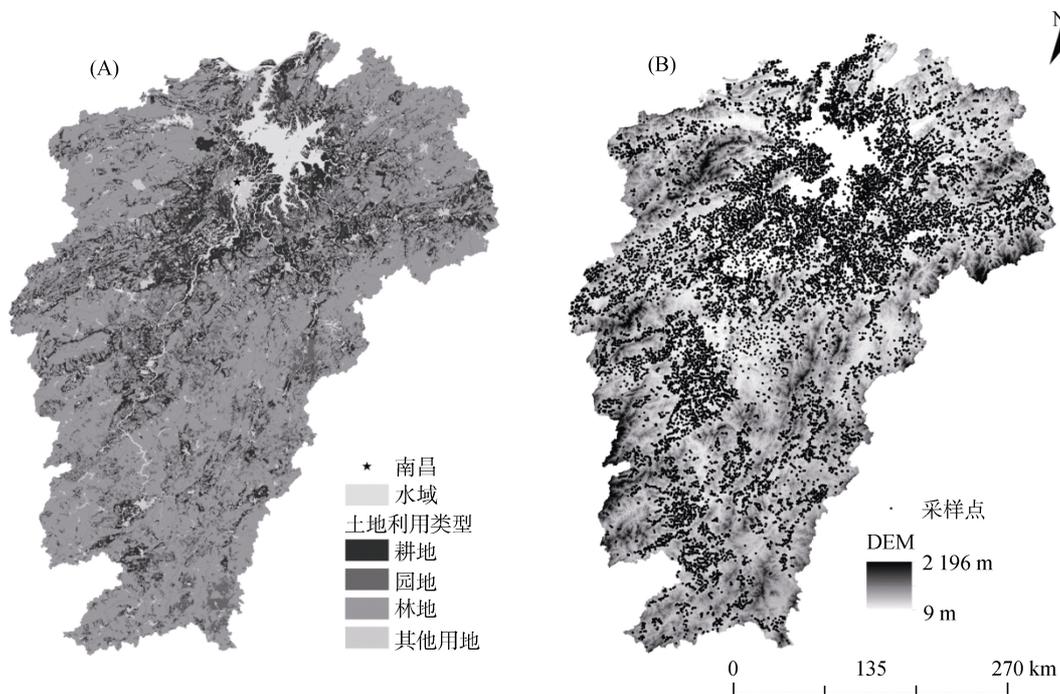


图 1 江西省土地利用类型、样点分布以及 DEM  
Fig.1 Landuse types, soil sampling sites, DEM in Jiangxi Province

### 1.2 土壤采样

土壤样品按照《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》,于 2012 年 11 月至 2013 年 2 月农作物收获后采用多点混合的方法采集耕地表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )土壤样品 16 582 个(图 1B)。每个样点采集样品  $1 \text{ kg}$ ,土壤样品经过自然风干后,带回实验室磨碎过筛,采用重铬酸钾( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )油浴加热测定土壤有机碳含量<sup>[25]</sup>。

### 1.3 数据处理

本文采用阈值法(3 倍的标准差)对采样点数据的土壤有机碳含量进行处理<sup>[26]</sup>,剔除后总耕地样点为 16 109 个。基于全省  $1:100\,000$  的地形图生成数字高程模型(DEM)。高程(H)、坡度(S)、坡度变率(SOS)、坡向(AS)、坡向变率(SOA)、地形起伏度(QFD)、曲率(C)、河流动能指数( $\Omega$ )均由 DEM 数据在 ArcGIS10.2 软件中处理提取。各地形因子的计算公

式见参考文献[7,28]。耕地利用方式、成土母质、土壤类型、灌溉能力和秸秆还田方式为定性变量,本文采用虚拟变量<sup>[14,28]</sup>进行赋值。虚拟变量经常取值为 0 和 1,但这些取值并不代表数量的大小,仅仅表示不同的类别。在回归分析中,定义虚拟变量是为了避免共线性。定义虚拟变量时,对  $k$  个互相排斥类别集定义  $k-1$  个虚拟变量来表示这些类别,当所有  $k-1$  个虚拟变量都取 0 时,那这个案例就属于第  $k$  类,我们称这一类为参照类。虚拟变量赋值如下:

$$X = \begin{cases} 1, & i\text{类} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (i=1,2,3,4,\dots,k)$$

式中:  $X$  表示某类定性因素,第  $i$  类表示肯定类型,其他表示否定类型。通过对定性变量进行虚拟变量赋值,实现对定性的定量化研究。本文只有某一类别的定性因素进行回归分析,等价于单因素方差分析,可

用于揭示不同变量是否存在显著差异,同时回归分析可以定量地表达各定性因素对土壤有机碳空间变异的独立解释能力。Pearson 相关性分析用于分析地形因子与土壤有机碳的相关性。常规性统计分析均在 SPSS(version 22)中完成。在 GS+ 软件对土壤有机碳进行半变异函数分析与模型拟合,采用 ArcGIS10.2 软件中普通克里格法对江西省土壤有机碳进行空间插值。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳的常规性统计分析

16 109 个土壤样点数据统计分析结果表明(表 1),土壤有机碳含量值域范围为 5.22 ~ 40.31 g/kg,平均值为 17.90 g/kg,与我国平均水平(17.53 g/kg)<sup>[29]</sup>相比,高出 0.37 g/kg,也高于江西省其他县市的土壤有机碳含量<sup>[30-31]</sup>。变异系数为 31.01%,呈中等程度的变异

性。从 K-S 检验的  $P > 0.05$  可以得出土壤有机碳均符合正态分布,可以进行半变异函数分析和普通克里格法插值。

### 2.2 半变异函数分析

半变异函数能较好地描述土壤有机碳空间分布的随机性和结构性,是刻画土壤有机碳空间变异最有效的方法。从图 2 和表 2 可以看出,土壤有机碳的最优模型为指数模型,模型的拟合系数为 0.713。从模型的参数来看,土壤有机碳的块金效应(随机性因素引起的空间变异占系统总空间变异的比值)<sup>[32-33]</sup>为 12.49%,表明土壤有机碳呈强空间相关性,受结构性因素引起的空间变异程度大于随机性因素。变程为 30.6 km,表明土壤有机碳的空间自相关范围较小,这与江西省复杂地形地貌空间结构特征相符合。

表 1 江西省耕地土壤有机碳的描述性统计特征  
Table 1 Descriptive statistics of farmland SOC in Jiangxi Province

土壤属性	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	K-S Sig.	是否正态
土壤有机碳	16 109	5.22	40.31	17.90	5.55	31.01	0.35	是

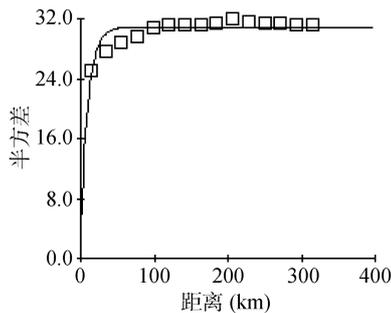


图 2 江西省土壤有机碳半方差函数图  
Fig.2 Isotropic semi-variogram of farmland SOC in Jiangxi Province

### 2.3 空间变异特征

为了直观反映土壤有机碳的空间变异特征,在半变异函数模型拟合的基础上运用普通克里格法对江西省耕地土壤有机碳进行空间插值,进而得到土壤有机碳的空间分布。如图 3 所示,江西省土壤有机碳高值区域主要分布在萍乡市、新余市、南昌市、抚州市与景德镇市;低值区域主要分布在九江市、赣州市、上饶市与吉安市。土壤有机碳含量在 14.0 ~ 18.0 g/kg 之间的区域面积最广,总体水平较高,与常规性统计分析结果较为一致。大部分高值区域均在海拔相对较低处(图 1B),与 Pearson 相关性分析结果一致。

表 2 土壤有机碳的半变异函数参数  
Table 2 Semi-variance parameters of farmland SOC

土壤属性	模型	块金值	基台值	块金效应(%)	变程(km)	拟合系数	残差
土壤有机碳	指数	3.86	30.91	12.49	30.60	0.713	1.470

### 2.4 土壤有机碳空间变异的影响因素

**2.4.1 地形因子** 地形因子通过影响土壤水热资源的再分配与土壤生态系统的物质循环过程与强度来影响土壤有机碳空间变异。Pearson 相关性分析结果表明(表 3),江西耕地土壤有机碳与高程呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ ),与坡向呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),相关系数分别为  $-0.031$  和  $0.021$ ,表明地形低洼处,坡向转北(阴坡)时,土壤有机碳含量越大,这与以往研究结果一致<sup>[6-7]</sup>。与其他地形因子相

关性均不显著,这与以往研究有所不同<sup>[13-14]</sup>。这可能与本文研究尺度有关,县域或小流域尺度相对省域尺度而言由于地形导致的土壤有机碳累积与迁移较为明显。

**2.4.2 成土母质** 成土母质通过影响土壤矿物质组成、物理化学风化过程与土壤质地等进而引起土壤有机碳含量的差异。成土母质对江西省土壤有机碳空间变异影响显著( $P < 0.01$ ,表 4)。不同成土母质类型间均值差异明显(表 5)。其中由碳酸岩类风化物发育

而来的土壤有机碳含量最高，为 18.96 g/kg；然后依次是第四纪红色黏土(18.67 g/kg)、酸性结晶岩类风化物(18.41 g/kg)、泥质岩类风化物(18.18 g/kg)、河湖沉积物(17.87 g/kg)、石英岩类风化物(17.68 g/kg)、紫色岩类风化物(17.50 g/kg)、红砂岩类风化物(16.92 g/kg)、下蜀系黄土状物(12.97 g/kg)。从变异系数来看，不同成土母质发育的土壤有机碳的变异系数范围在 25%~75%，均为中等程度的变异性。

**2.4.3 土壤类型** 表 4 表明不同土壤类型土壤有机碳含量差异显著( $P<0.01$ )，表 6 表明不同土壤类型平均值差异明显。从土类可以看出，以水稻土平均值含量最高，为 18.18 g/kg，远远大于其他土类，其次为石灰土(13.76 g/kg)，含量最低的为黄褐土(11.28 g/kg)。从亚类来看，水稻土 3 种亚类均值为：潜育型水稻土>潴育型水稻土>淹育型水稻土，这表明水稻土的不同亚类之间由于成土过程、发育程度以及耕作管理水平的不同导致其土壤有机碳含量存在差异性。从不同土属的均值含量看，17 个土属中，以黄泥田土壤有机碳含量最高，平均值达到 18.97 g/kg，是含量最小的马肝泥土的 1.70 倍。从土类、亚类和土属的变异系数来看，变异系数范围为 19.31%~31.35%，均呈中等程度的变异性。

**2.4.4 耕地利用方式** 从表 7 可以看出，不同耕地利用方式平均值差异明显，其平均含量大小依次为：两季水田(18.43 g/kg)>一季水田(17.70 g/kg)>水旱轮作(17.69 g/kg)>一季旱地(12.66 g/kg)>两季旱地(12.11 g/kg)，表现为水田大于旱地的总体趋势。这是因为水田一般灌溉条件好，处于淹水时间长，作物管

理水平较高，有机碳分解缓慢且不易流失；而旱地由于土壤通气条件较好，土壤有机碳矿化速率大，同时地表作物大多被人为收取，归还量小，这使得土壤有机碳处于相对较低水平<sup>[6,19]</sup>。从变异系数来看，变异系数在 21.14%~31.91%，均为中等变异性。

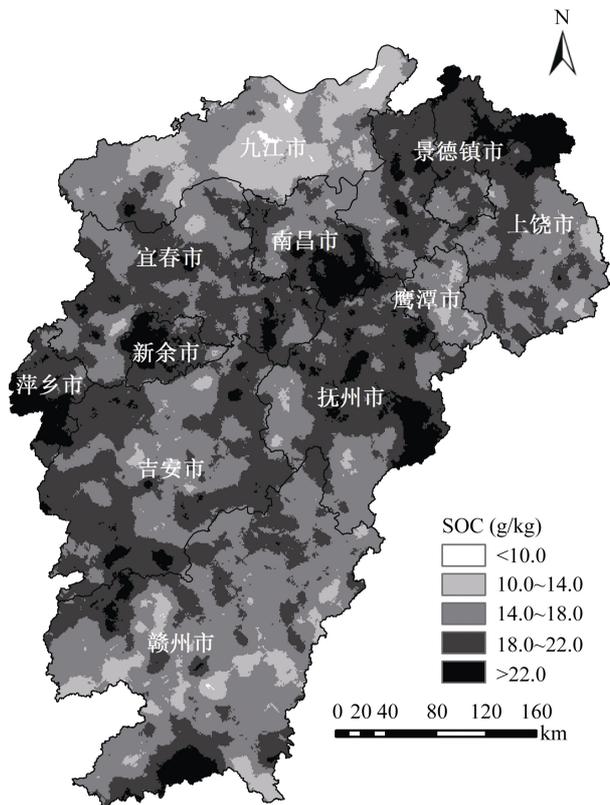


图 3 江西省耕地土壤有机碳空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of farmland SOC in Jiangxi Province

表 3 地形因子与土壤有机碳的 Pearson 相关系数  
Table 3 Pearson's correlations between terrain factors and farmland SOC

	高程	坡度	坡向	曲率	坡度变率	坡向变率	河流动能指数	地形起伏度
有机碳	-0.031**	-0.002	0.021*	0.003	-0.004	0.012	0.005	-0.008

注：\*表示相关性达到  $P<0.05$  显著水平，\*\*表示相关性达到  $P<0.01$  显著水平。

表 4 不同因素对土壤有机碳的回归分析  
Table 4 Regression analysis of farmland SOC with different factors

影响因素	F 值	决定系数	校正决定系数	P
地形因子	10.44	0.001	0.001	0.05
耕地利用方式	200.44	0.057	0.057	0.01
成土母质	75.21	0.027	0.026	0.01
土类	448.48	0.051	0.051	0.01
亚类	300.86	0.058	0.056	0.01
土属	621.52	0.060	0.059	0.01
灌溉能力	79.76	0.010	0.009	0.01
秸秆还田方式	5 342.70	0.392	0.389	0.01

表 5 不同成土母质类型土壤有机碳描述性统计特征  
Table 5 Descriptive statistics characteristics of farmland SOC with different parent materials

成土母质类型	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	是否正态
第四纪红色黏土	2 456	5.92	35.44	18.67	5.65	30.26	是
河湖沉积物	3 002	6.73	34.51	17.87	5.46	30.55	是
红砂岩类风化物	2 425	7.02	40.31	16.92	5.32	31.44	是
泥质岩类风化物	3 649	7.02	35.38	18.18	5.49	30.20	是
石英岩类风化物	1 010	7.02	37.99	17.68	5.60	31.67	是
酸性结晶岩类风化物	2 159	7.02	37.76	18.41	5.34	29.01	是
碳酸岩类风化物	428	7.42	39.73	18.96	6.37	33.60	是
下蜀系黄土状物	340	5.22	27.72	12.97	4.20	32.38	是
紫色岩类风化物	640	7.07	36.37	17.50	5.62	32.11	是

表 6 不同土壤类型土壤有机碳描述性统计特征  
Table 6 Descriptive statistics characteristics of farmland SOC with different soil types

土类	亚类	土属	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	是否正态
水稻土	潜育型水稻土	潮沙泥田	251	7.48	32.66	18.45	5.67	30.73	是
		麻沙泥田	366	7.20	31.84	18.82	5.60	29.76	是
		亚类合计	617	7.20	32.66	18.72	5.62	30.02	是
	淹育型水稻土	红沙泥田	64	7.71	33.29	17.06	5.10	29.89	是
		麻沙泥田	25	11.48	30.05	18.86	5.38	28.53	否
		亚类合计	89	7.71	33.29	17.57	5.25	29.88	是
	潴育型水稻土	潮沙泥田	3 796	7.02	34.51	18.04	5.41	29.99	是
		红沙泥田	2 273	7.13	40.31	17.00	5.33	31.35	是
		黄泥田	2 363	7.08	35.44	18.97	5.56	29.31	是
		麻沙泥田	2 815	7.02	37.99	18.29	5.37	29.36	是
		鳝泥田	3 367	7.02	39.73	18.39	5.55	30.18	是
		亚类合计	14 614	7.02	40.31	18.16	5.49	30.23	是
		土类合计	15 320	7.02	40.31	18.18	5.50	30.25	是
	红壤	红壤	黄泥	125	8.00	25.58	12.59	2.92	23.19
黄沙泥			87	7.89	27.84	12.76	3.98	31.19	否
亚类合计			213	7.89	27.84	12.79	3.44	26.90	是
棕红壤		鳝泥	143	7.25	17.11	11.78	2.76	23.43	是
		黄泥	98	5.92	17.28	12.76	2.57	20.14	是
		亚类合计	241	5.92	17.29	12.15	2.64	21.73	是
		土类合计	454	5.92	27.84	12.43	3.04	24.46	是
黄褐土	黏盘黄褐土	黏盘黄褐土	40	8.18	17.29	11.58	2.71	23.40	否
		马肝泥土	146	5.22	17.17	11.19	2.78	24.84	是
		土类合计	186	5.22	17.29	11.28	2.77	24.56	是
石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土	47	8.18	36.14	13.76	4.31	31.32	是
潮土	壤质潮土	壤质潮土	62	8.41	17.40	13.00	2.51	19.31	是
		潮沙泥土	40	6.73	20.42	13.44	3.30	24.55	是
		土类合计	102	6.73	17.52	12.94	2.72	21.02	是

表 7 不同耕地利用方式土壤有机碳描述性统计特征  
Table 7 Descriptive statistics of farmland SOC with different landuse types

耕地利用方式	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	是否正态
一季水田	3 364	7.02	37.82	17.70	5.48	31.00	是
两季水田	11 480	7.02	40.31	18.43	5.51	29.90	是
一季旱地	336	5.22	36.13	12.66	4.04	31.91	是
两季旱地	431	5.92	24.13	12.11	2.56	21.14	是
水旱轮作	498	7.02	32.48	17.69	5.38	30.41	是

**2.4.5 灌溉能力** 灌溉作为耕地的主要管理措施之一,除了可以改善土壤水分状况,满足作物生长需求外,还可能带来土壤有机碳矿化分解速率、微生物生物量及其活性、根系生物量以及气体在土壤孔隙中扩散速率等的改变进而影响土壤有机碳含量<sup>[23,34]</sup>。不同灌溉能力间土壤有机碳含量差异显著( $P<0.01$ ,表 4)。从表 8 可以看出,在水分亏缺条件下,土壤有机

碳含量均值与灌溉能力呈正比,最大最小值也说明了这一点。这是因为灌溉带来的土壤含水量增加促进了根系的呼吸以及微生物群落的活动,增加了土壤呼吸的速率,使得土壤有机碳含量上升。从变异系数看,不满足的变异系数为 34.17%,基本满足的变异系数为 30.51%,充分满足的变异系数为 30.64%,均表现中等变异性。

表 8 不同灌溉能力下土壤有机碳描述性统计特征值  
Table 8 Descriptive statistics of farmland SOC with different irrigation capacities

灌溉能力	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	是否正态
不满足	1 692	5.22	37.82	16.39	5.60	34.17	是
基本满足	11 479	5.92	39.73	17.96	5.48	30.51	是
充分满足	3 411	7.08	40.31	18.44	5.65	30.64	是

**2.4.6 秸秆还田方式** 从表 9 可以看出 秸秆不还田与还田土壤有机碳含量差异明显,秸秆还田比不还田土壤有机碳增加 63.70%~71.32%。究其原因:秸秆不还田时,部分碳以农产品和作物秸秆的形式向系统外输出,导致土壤有机碳含量降低。秸秆还田后,秸秆周围会有大量的微生物进行繁殖,形成土壤微生物活动层,加速了对秸秆中有机态养分的分解释放,可提高土壤有机碳含量<sup>[21-22]</sup>。且秸秆释放有机物

质是个逐渐的过程,这样既增加土壤有机质含量,又有利于土壤改良和可持续发展。同时,翻压和覆盖两种还田方式下土壤有机碳均值差异显著( $P=0.000$ ),具体表现为覆盖还田>翻压还田。这是因为覆盖由于不扰动土壤,大大降低了土壤有机碳的矿化率,从而增加土壤有机碳含量。从变异系数的范围(23.46%~24.90%)可以得出,不同秸秆还田方式均呈中等程度的变异性。

表 9 不同秸秆还田方式下土壤有机碳描述性统计特征值  
Table 9 Descriptive statistics of farmland SOC with different straw returning patterns

秸秆还田方式	样点数	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	变异系数(%)	是否正态
不还田	3 924	5.22	36.13	11.68	2.74	23.46	是
翻压还田	9 518	11.66	40.31	19.12	4.71	23.54	是
覆盖还田	2 667	11.65	37.82	20.01	4.76	24.90	是

## 2.5 主控因素研究

为定量解释各影响因素对土壤有机碳的空间变异的独立解释能力。对地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型、灌溉能力和秸秆还田方式进行回归分析(表 4)。地形因子对土壤有机碳空间变异的独立解释能力较低,仅为 0.1%;灌溉能力次之,为 0.9%;成土母质的独立解释能力为 2.6%;耕地利用方式的独立解释能力为 5.7%;土类、亚类和土属分别能解

释 5.1%、5.6% 和 35.9% 的土壤有机碳空间变异,土壤类型的独立解释能力随分类级别降低而升高,这与其他区域研究结果一致;这是因为级别越低,反映的成土过程、母岩特性、土体构型等信息越多,因此其独立解释能力越高。秸秆还田方式的独立解释能力最高,为 38.9%,远远高于其他影响因素。这表明江西省土壤有机碳空间变异的主控因素为秸秆还田方式。

### 3 讨论

#### 3.1 结构性因素对土壤有机碳的影响

江西省耕地表层土壤有机碳空间分布主要受结构性因素和随机性因素共同影响。耕地利用方式的独立解释能力为 5.7%，相对于地形因子与成土母质而言影响较高，但要低于顾成军等<sup>[9]</sup>对河北平原地区以及罗由林等<sup>[11]</sup>对川中丘陵地区的研究结果。其原因是不同土地利用方式下土壤有机碳差异显著可能与有机物本身化学性质的差异以及碳氮的积累速度<sup>[35-36]</sup>有关，而本文只研究耕地，无法比较更多土地利用方式下的土壤有机碳空间变异状况。土壤类型对土壤有机碳空间变异性的独立解释能力与土壤分类级别呈反比，这与 Bell 等<sup>[37]</sup>和张忠启等<sup>[38]</sup>研究结果基本一致，这是因为相同土壤类型具有相似的土壤性质，而不同土壤类型其反映成土过程、母质特性与发育阶段性信息具有显著差异。

#### 3.2 随机性因素对土壤有机碳的影响

秸秆还田方式在本研究所有影响因素中对土壤有机碳空间变异的独立解释能力最高，达到 38.9%，远远高于其他因素。究其原因：还田与不还田：秸秆进入土壤后，在适宜条件下向矿化和腐殖化两个方向进行。一方面，在微生物的作用下被矿化；另一方面，在中间产物或者被微生物利用形成代谢产物集成产物，继续在微生物的参与下重新组合形成腐殖质的过程。矿化与腐殖化均会改变土壤有机碳含量。翻压还田与覆盖还田：二者均可改善土壤有机碳含量。秸秆翻压还田一方面为耕地提供了丰富的碳源，增加土壤有机碳含量；另一方面，改善土壤结构，使土壤表层疏松，减少土壤毛细管作用，相应减少了土壤有机碳的流失。而秸秆覆盖除了以上两方面原因外，更主要的原因是：地表覆盖物削弱太阳对土壤的照射，降低土壤温度，从而更有利于土壤有机碳的积累。同时由于覆盖还田不扰动土壤，大大降低了土壤有机碳的矿化率，从而增加土壤有机碳含量。有研究表明<sup>[21-22]</sup>，我国秸秆还田率远低于其他国家，因此加强我国秸秆还田率与改进秸秆还田方式是调控江西省土壤有机碳含量、促进农业持续发展与环境保护的重要手段。当然，秸秆还田需结合我省各地区的基本情况、农业环境情况和土壤质地类型，因地制宜地确定还田时间、温度和数量，并与家禽粪便、化肥配合施用，充分考虑影响秸秆碳氮等物质释放的因素，增加秸秆还田率，促进土壤碳循环农业可持续发展。

### 4 结论

1)江西省土壤有机碳含量在 5.22 ~ 40.31 g/kg，平均含量 17.90 g/kg。变异系数为 31.01%，呈中等程度的变异性。经半变异函数分析，土壤有机碳块金效应值为 12.49%，表明有机碳含量受结构性因素的影响要大于随机性因素；变程为 30.6 km，空间自相关范围较小，高值区域只要分布萍乡市、新余市、南昌市、抚州市与景德镇市，低值区主要分布在九江市、赣州市、上饶市和吉安市。

2)在各影响因素中，地形因子对土壤有机碳空间变异的独立解释能力为 0.1%；灌溉能力的独立解释能力为 0.9%；成土母质能独立解释 2.6% 的有机碳空间变异；耕地利用方式能独立解释 5.7%；土类、亚类、土属的独立解释能力分别为 5.1%、5.6% 和 5.9%；秸秆还田方式独立解释能力最高，为 38.9%，是影响江西省耕地表层土壤有机碳空间变异的主控因子。

#### 参考文献：

- [1] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 环境因素对密云水库上游流域土壤有机碳和全氮含量影响的通径分析[J]. 生态环境学报, 2014, 1(8): 1378-1383
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [3] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/2/3): 344-348
- [4] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于 RBF 神经网络的土壤有机质空间变异研究方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 87-93
- [5] 潘成忠, 上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 371-375
- [6] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 652-660
- [7] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194
- [8] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于神经网络模型的中国表层土壤有机质空间分布模拟方法[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 175-184
- [9] 顾成军, 史学正, 于东升, 等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子——土壤类型与土地利用比较[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 425-432
- [10] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 70-75

- [11] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 582-593
- [12] 李婷, 张世熔, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 863-868
- [13] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177-185
- [14] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 34-42
- [15] Sarmiento L, Bottner P. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: Indications for fertility restoration[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(1): 79-89
- [16] 王永旭, 陈波浪, 袁郁文, 等. 耕地土壤养分空间变异特征研究[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(1): 145-150
- [17] 马泉来, 高凤杰, 张志民, 等. 我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3): 382-390
- [18] 杨柳, 胡玉福, 许宗林, 等. 川中丘陵区土壤养分时间变异特征研究——以中江县玉兴镇为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1057-1062
- [19] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178
- [20] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 298-303
- [21] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535
- [22] 陈金, 唐玉海, 尹燕枏, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 160-167
- [23] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1764-1773
- [24] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57-60
- [25] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [26] 王丹丹, 史学正, 于东升, 等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1049-1053
- [27] Wang B W, Zhou W J, Ma S, et al. Regression-kriging of soil organic matter using the environmental variables derived from MODIS and DEM[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(4): 838-842
- [28] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, 19(1): 51-53
- [29] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤有机质空间分布模拟分析方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1385-1399
- [30] 舒建英, 张世熔, 孙波, 等. 江西兴国水土流失治理区土壤有机质动态变化[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1240-1246
- [31] 罗明, 潘贤章, 孙波, 等. 江西余江县土壤有机质含量的时空变异规律研究[J]. 土壤, 2008, 40(3): 403-406
- [32] Hernandezstefanoni J L, Ponchehernandez R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2006, 117(1/2/3): 307-334
- [33] Zhu Q, Lin H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 594-606
- [34] O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, et al. Moisture and vegetation controls on decadal-scale accrual of soil organic carbon and total nitrogen in restored grasslands[J]. Global Change Biology, 2010, 16(9): 2573-2588
- [35] Fu X L, Shao M G, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 155(1/2): 31-35
- [36] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1214-1223
- [37] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline: The undervalued role of land management[J]. Geoderma, 2009, 152(1/2): 74-84
- [38] 张忠启. 样点布置模式及密度对揭示土壤有机碳空间变异的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010

## Study on Main Controlling Factors of Spatial Variability of Farmland SOC in Jiangxi Province

JIANG Yefeng<sup>1,2</sup>, RAO Lei<sup>1,2</sup>, GUO Xi<sup>1,2\*</sup>, YE Yingcong<sup>2</sup>, SUN Kai<sup>1,2</sup>,  
LI Jie<sup>1,2</sup>, WANG Lanke<sup>1,2</sup>, LI Weifeng<sup>1,2</sup>

(1College of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2 Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Accurately accessing spatial variability of farmland SOC and its main driving factors at provincial scale has great influence in regulating soil carbon and environmental protection. The spatial variability of farmland SOC of Jiangxi Province and its controlling factors were quantitatively studied based on 16 582 farmland topsoil samples(0-20 cm) collected in 2012 with the methods of ordinary kriging, variance analysis and regression analysis. The results showed that farmland SOC ranged from 5.22 to 40.31 g/kg, with an average of 17.90 g/kg and the coefficient of variation of 31.01%. The range of farmland SOC was 30.6 km, the nugget/still ratio were 12.49%, indicating the structural factors played a more important role in the spatial variability of SOC than stochastic factors. The high value of SOC are mainly distributed in Pingxiang, Xinyu, Nanchang, Fuzhou and Jingdezhen. Terrain factors, irrigation capacity, parent material, farmland-use type, soil type and straw returning patterns had significant impact on the spatial variability of SOC( $P<0.01$ ), but the influence degrees were different, in which straw returning pattern could explain 38.9% of SOC spatial variability and could be regarded as the main controlling factor of spatial variability of farmland SOC in Jiangxi Province.

**Key words:** Soil organic carbon; Jiangxi Province; Spatial variability; Main controlling factors; Straw returning