

江淮丘陵区农田表层土壤有机碳空间变异^① ——以定远县为例

马渝欣^{1,2}, 李徐生^{1*}, 李德成^{2*}, 韩志勇¹, 张甘霖², 张兆冬³, 王莉莉³

(1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 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; 3 定远县土壤肥料工作站, 安徽滁州 233200)

摘要: 以安徽省江淮丘陵区农业大县滁州市定远县为代表, 运用统计学方法、地统计学方法和 GIS 技术研究了农田表层(0 ~ 20 cm)土壤有机碳(SOC)含量的空间分布及其影响因子。统计结果表明: 研究区 2011 年 SOC 含量为 (10.96 ± 3.63) g/kg, 变异系数为 33.12%, 属于中等变异程度。地统计分析结果表明, 研究区 SOC 半方差模型为指数模型, 存在强烈的空间自相关性, SOC 含量在空间分布上表现为由东至西先递减后递增, 大致呈带状分布。土壤颗粒组成和秸秆还田是影响 SOC 空间变异的主要因素。

关键词: 土壤有机碳; 空间变异; 土壤颗粒组成; 秸秆还田

中图分类号: S153.6

土壤有机碳(SOC)是近年来全球变化研究的三大热点之一, 表层(0 ~ 20 cm)SOC 是评估农田 SOC 的一个重要指标^[1]。很多研究表明, 自第二次土壤普查近 30 年来, 我国大部分农田 SOC, 尤其是表层 SOC 基本呈增加的趋势^[2-6], 并认为这与秸秆还田、合理施用有机肥与化肥以及少(免)耕技术推广有关^[7-8]。

关于农田表层土壤 SOC 方面已开展的研究, 一是更多关注区域性大的尺度, 基于全面土壤调查对比分析的县域尺度的研究还较少^[9], 二是研究对自然因素和土地利用等关注的多, 虽然也涉及秸秆还田的影响, 但缺乏具体的一手数据加以定量分析, 而已有研究表明秸秆还田对 SOC 有显著影响^[10]。

安徽省是我国华东地区的一个农业大省^[11], 其耕地面积约 5.7 万 hm^2 , 在国内排名第八; 粮食总产约 3.3×10^7 t, 在国内排名第六。安徽省在地貌上大致分为淮北与沿淮平原区、江淮丘陵区、皖西大别山区、沿江平原区和皖南山地丘陵区, 江淮丘陵区包括合肥、滁州等地, 土地面积占全省国土面积的 1/4, 耕地面积约占全省的 28%^[12], 是安徽省主要农业生产地区之一。为此, 本文选择了定远县作为安徽省江淮丘陵区典型农业大县, 重点研究县域尺度 SOC 含

量变化及秸秆还田对其的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

定远县隶属滁州市, 位于安徽省东部, 地理位置 $117^{\circ}13' \sim 118^{\circ}16'E$, $32^{\circ}13' \sim 32^{\circ}42'N$, 面积 2 998 km^2 。属于北亚热带向暖温带过渡性气候, 多年年均气温为 14.8°C , 无霜期为 210 天, 降水量为 934.1 mm。地势为北高南低, 海拔由北向南逐渐降低, 介于 16 ~ 348 m。成土母质主要为下蜀黄土、古黄土性沉积物、各种岩类风化残积、坡积物, 土壤类型以水稻土(水耕人为土)、黄棕壤(湿润淋溶土)为主, 并有少量紫色土(紫色湿润雏形土/紫色正常新成土)、石灰土(湿润淋溶土/湿润雏形土)和砂姜黑土(砂姜潮湿雏形土或砂姜钙积潮湿变性土), 分别占全县总土地面积的 37.8%、24.2%、9.92%、9.1% 和 2.78%。由于水热条件较为优越, 现有耕地主要是小麦-水稻轮作。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 2011 年, 在与定远县土壤肥料工作站一起进行实地调查研究的基础上, 综合考虑了第二次土壤普查的土种类型、土壤利用、地形地

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050503)和国家科技基础性工作专项(2008FY110600)资助。

* 通讯作者(dcli@issas.ac.cn; lixusheng@nju.edu.cn)

作者简介: 马渝欣(1989—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向为环境演变与全球变化。E-mail: myx2007an@126.com

安徽省定远县土壤普查办公室。定远土壤, 1985

貌、种植模式、管理措施和产量高低等各种因素，在 Google Earth 卫星影像上确定了 70 个典型调查田块，均为水田，并提取样点 GPS 经纬度信息，用于田间调查采样定位。采样时间为 2011 年 6—7 月。另外通过对定远县 2008 年以来开展的测土配方施肥工作调查采集的近 1 500 个田块综合分析，最后选择了 916 个田块作为补充，合计调查的农田样点 986 个(图 1)，采样深度均为 0~20 cm。土样采集方法为在一块田内进行随机多点取样，混匀后按四分法取 1.5~2 kg 用于分析测定。

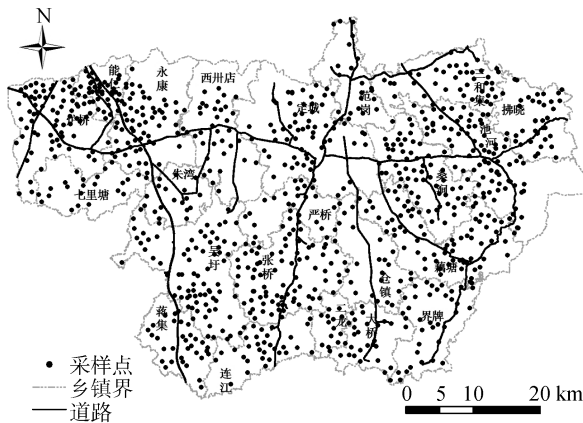


图 1 研究区采样点分布
Fig. 1 Sampling points in study area

1.2.2 土壤样品测定 样品在实验室自然风干后，用木棍或塑料棍压碎，同时将土样中的植物残根、侵入体和新生体剔除干净，研磨过 10 目筛。采用重铬

酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化-滴定法测定 SOC 含量，采用吸管法按美国农业部制分级(砂粒 2~0.02 mm、粉粒 0.02~0.002 mm、黏粒 <0.002 mm)测定土壤机械组成^[13]。

1.2.3 数据处理 采用 SPSS 17.0 软件对 SOC 含量进行描述性统计、K-S 检验以及相关分析。采用 GS+9.0 软件进行地统计学分析。半方差函数是地统计学的基本工具，是描述区域化随机变量空间变异结构的一个函数，公式如下：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] \quad (1)$$

式中： $\gamma(h)$ 是间距为 h 的半方差，该值随 h 的增加而增加。

采用 ARCGIS9.3 软件的 Geostatistics 模块进行普通 Kriging 插值，绘制 SOC 空间分布图，分析空间变异特征。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳含量的统计特征

由表 1 可知，研究区 2011 年 SOC 含量 1.10~33.72 g/kg，平均值 10.96 g/kg，变异系数为 33.12%，属于中等变异程度^[14]。从土壤类型看，潮土 SOC 变异强度最小(CV = 31.59%)，石灰土 SOC 变异强度最大(CV = 37.51%)。

对区域化变量进行空间分析必须以空间数据的正态分布为前提，用 SPSS 17.0 软件对原始数据进行分析后发现其不符合正态分布，经对数转换后符合正态分布，满足地统计学的要求。

表 1 SOC 描述性统计(g/kg)
Table 1 Statistical characteristics of SOC contents

样本	样点数	最大值	最小值	均值	标准差	CV(%)	偏度	峰度	K-S 值
潮土	16	23.68	6.55	12.79a	4.04	31.59	1.130	2.543	0.908
黄棕壤	331	25.27	2.55	10.75b	3.67	34.14	1.165	2.231	0.010
砂姜黑土	65	24.79	5.51	11.35ab	3.75	33.04	1.755	3.941	0.013
石灰土	40	26.06	3.89	11.09ab	4.16	37.51	1.722	3.824	0.133
水稻土	492	33.72	1.10	10.92b	3.51	32.14	1.913	8.979	0.012
紫色土	38	23.89	6.44	11.69ab	3.75	32.08	1.269	1.714	0.193
全样本	982	33.72	1.10	10.96	3.63	33.12	1.567	5.283	0.000
对数转换	982	3.52	0.10	2.34	0.32	13.68	-0.342	3.473	0.076

注：同列不同小写字母表示不同土壤类型 SOC 含量差异显著(P < 0.05)。

2.2 土壤有机碳含量的空间变异特征

运用地统计学和 GIS 技术相结合的方法分析了 SOC 的空间变异^[14]。运用 GS+软件对研究区 SOC 含量进行变异函数模拟，根据决定系数(R²)最大，残差(RSS)最小的原则(表 2)，研究区 SOC 含量半方差模型为指数模型(图 2)。

表 2 中 C₀ 为块金值，C₁ 为偏基台值，C₀+C₁ 表示基台值， a 为变程。C₀ 主要由随机因素的变异引起，C₁ 主要由空间自相关因素之间的变异引起。块金值/基台值(C₀/(C₀+C₁))为块金系数，表示空间异质性程度，该比值高说明随机部分引起的空间变异程度高；相反，说明空间自相关部分引起的空间异质性程度

表 2 SOC 含量半方差函数模型及参数
Table 2 Semivariance function model and parameters of SOC contents

样点数	理论模型	C_0	C_1	$C_0/(C_0+C_1)$	$a(\text{km})$	R^2	RSS
982	指数模型	0.01	0.09	0.10	6.3	0.947	4.39E-06

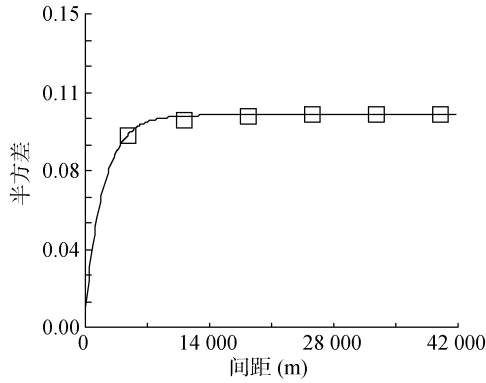


图 2 SOC 含量各向同性半方差函数
Fig. 2 Isotropic semivariogram of SOC contents

高。一般认为,若比值 $<25\%$,说明变量具有强烈的空间相关性,所研究的变量在整个尺度上具有恒定的变异;在 $25\% \sim 75\%$ 之间,变量具有中等的空间相关性; $>75\%$ 时,变量空间相关性微弱,说明变异主要是由随机部分引起的,不适合用空间插值的方法进行空间预测。

从表 2 可以看出,研究区 SOC 含量半方差理论模型的 C_0 为 0.01,说明在当前采样尺度范围内存在由采样误差、空间变异等随机因素引起的变异。 $C_0/(C_0+C_1)$ 为 10% ,说明由随机因素引起的空间变异程度占总的空间变异程度的比值为 10% ,SOC 含量在区域内存在强烈的空间自相关性,由随机因素引起的变异极小,结构因素是影响空间变异的主要因素。 a 的大小反映了空间变异尺度,能够准确反映区域化变量自相关范围的大小。 a 约为 6.30 km ,说明研究区 SOC 含量超出此范围不具有空间相关性,相关距离为 6.3 km ,小于胡克林等^[15]的相关研究结论(空间相关距离为 49.00 km),而 SOC 具有强烈的空间相关性这一点也与其他研究报道^[16-17]中 SOC 具有中等程度的空间相关性不一致,说明本研究区域特殊的结构性因素对 SOC 空间变异影响较明显。

2.3 土壤有机碳含量的空间分布

根据半方差理论模型参数,以 $\ln \text{SOC}$ 为变量,采用普通 Kriging 方法,对定远县土壤样点数据进行插值,选取影响估计值的邻近样点数为 12,得到 SOC 含量的预测图,通过图形计算,转换为实际的 SOC 含量,得到 SOC 含量的空间分布图(图 3)。

从图 3 可以看出,SOC 含量由东至西先递减后递增,大致呈带状分布。高值区出现在西部经济较为

发达的炉桥镇,综合加工工业园区境内以及东部的拂晓乡和界牌集镇。低值区出现在地势起伏较大、经济相对落后的北部范岗乡。



图 3 SOC 含量的分级图
Fig. 3 Classification of SOC contents

2.4 土壤有机碳含量空间变异影响因素分析

2.4.1 自然因素 有研究表明,地势起伏较大的地区,由于海拔梯度大,气温、大气湿度、土壤湿度等差异也大,SOC 含量与海拔之间一般会呈现显著的正相关^[18]。而起伏不大的地区,大气湿度基本一致,SOC 主要受土壤湿度影响,而土壤湿度主要受地下水位高低的影响。地势较高的地区,一是土壤养分因灌水、降雨而易淋失,二是有机质分解迅速,不易积累,进而导致 SOC 含量相对低于地势较低的地区^[19]。

定远县海拔高度低于 348 m ,海拔梯度较小。地势上由北向南至池河沿岸逐渐降低,但东西方向变化不大,而其 SOC 含量在空间上分布为由东至西先递减后递增,与海拔高度之间并没有相关性(图 4)。

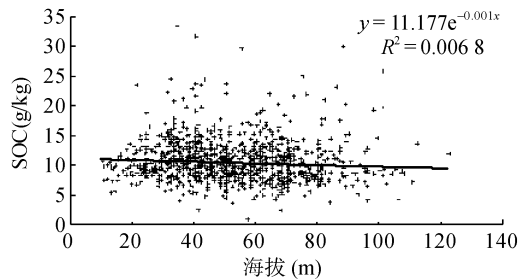


图 4 SOC 含量与海拔高度的关系
Fig. 4 Correlation between SOC content and altitude

研究表明: SOC 含量与土壤黏粒含量之间有很好的正相关性^[20-24],粉粒对土壤水分有效性、植被生长的正效应作用较强^[25],而砂粒含量较高的土壤对 SOC 的保护作用较弱,SOC 分解较快。从表 3 可

以看出,70 个典型农田的表层 SOC 含量与土壤黏粒和粉粒含量呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.40 和 0.44,与砂粒含量呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数为 -0.53。这表明,土壤颗粒组成/质地是影响研究区 SOC 空间变异的主要自然原因。

2.4.2 人为因素 (1)施肥。农田施肥直接或间接地调控土壤有机质的输入,一定程度上影响 SOC 的积累和矿化^[26]。在一定土壤肥力条件下,施用有机肥能提高 SOC 含量,从而有利于改善土壤质量,提高土壤肥力。但对 79 个典型田块的施肥调查表明(表 4),基本没有施用畜禽粪便等农家肥和商品有机肥,主要是化肥,因此可以认为有机肥对定远县农田表层

SOC 含量的影响很低,而化肥主要是增加了农作物的生物量,间接表现在秸秆、留茬和根系对 SOC 的影响上。

表 3 土壤颗粒组成与 SOC 含量的相关系数矩阵
Table 3 Correlation matrix between SOC contents and soil particle size fractions

	SOC 含量	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量
SOC 含量	1			
粉粒含量	0.44**	1		
黏粒含量	0.40**	0.31*	1	
砂粒含量	-0.53**	-0.81**	-0.79**	1

注:**表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关;*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; $n = 70$ 。

表 4 定远县农田施肥情况(小麦-水稻双季合计, kg/hm^2 , $n = 79$)

Table 4 Information of farmland fertilization in Dingyuan County

施肥方式	复合肥	尿素	配方肥	缓释肥	复混肥	农家肥	商品有机肥
基肥	405	×	×	×	×	×	×
追肥	300	150	×	×	×	×	×

注:×表示没有施用该化肥。

(2) 秸秆还田。秸秆还田是农业生产中重要的技术措施^[27],一方面可以增加 SOC 的积累,对 SOC 的固定、矿化起到重要的调节作用。与秸秆焚烧相比,秸秆还田能使 SOC 含量提高约 30%^[28]。另一方面可以提高土壤的保水保肥能力,改良土壤结构,增强土壤抗蚀抗旱性能,对农业可持续发展具有重要意义^[29]。

在定远县调查了 79 个典型田块的秸秆还田情况,轮作制度均为小麦-水稻。调查结果表明,小麦秸秆几乎是 100% 田间直接焚烧,对 SOC 含量的影响主要是地上部的留茬和地下部的根系;而水稻秸秆还田比例则为 70% 左右,因此水稻对 SOC 含量的影响最大,除了留茬和根系外,还有秸秆。从图 5 可以看出,定远县东部和西部地区水稻秸秆还田比例较高,这与农业生产示范基地多、公路多有关,秸秆还

田工作抓得比较紧,从而导致东部和西部 SOC 含量较高。

3 结论

(1) 定远县农田表层 SOC 含量为 $(10.96 \pm 3.63) \text{ g}/\text{kg}$,变异系数为 33.12%,属于中等变异程度。SOC 的半方差变异函数模型以指数模型为最佳拟合模型,空间自相关性强烈,相关距离为 6.3 km,区域特殊的结构性因素对 SOC 空间变异影响较明显。

(2) 普通 Kriging 插值的结果显示,SOC 空间分布格局为由东至西先递减后递增,大致呈片状分布。SOC 的空间变异主要受土壤机械组成和秸秆还田的影响。

参考文献:

- [1] 任军,郭金瑞,边秀芝,闫孝贡,刘钊剑,吴景贵. 土壤有机碳研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2009(6): 1-8
- [2] 王绍强,周成虎,李克让,朱松丽,黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000, 55(5): 533-544
- [3] 梁二,蔡典雄,代快,张丁辰,冯宗会,刘爽,王燕,王小彬. 中国农田土壤有机碳变化: I 驱动因素分析[J]. 中国土壤与肥料,2010(6): 80-86
- [4] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报,1999, 15(5): 330-332
- [5] 邵继承,闫明,程琨,潘根兴. 中国农田表土有机碳含量变化探讨——基于中文期刊网论文资料的统计分析[J]. 农业环境科学学报,2011, 30(9): 1 816-1 821

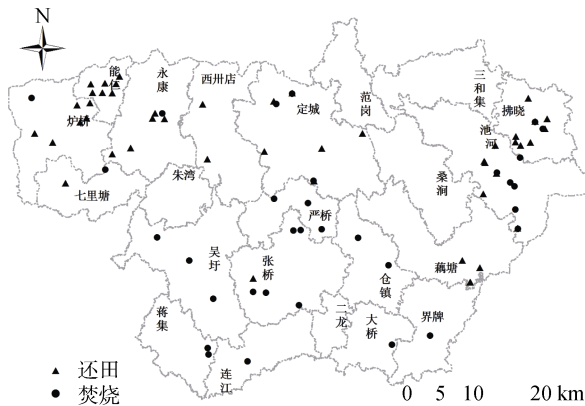


图 5 定远县秋收作物(水稻)的秸秆还田情况
Fig. 5 Rice straw-returning to field in Dingyuan County

- [6] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 中国耕作土壤有机碳的动态变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 123-130
- [7] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 刘运通, 万运帆, 秦晓波, 石锋. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 734-743
- [8] Piao SL, Fang JY, Ciais P, Peylin P, Huang Y. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458: 1 009-1 013
- [9] 许新旺. 农田土壤有机碳变化研究[M]. 安徽芜湖: 安徽师范大学出版社, 2011
- [10] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 郑华. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108
- [11] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011
- [12] 安徽省统计局, 国家统计局. 安徽省统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011
- [13] 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
- [14] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16
- [15] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 王茹. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764-771
- [16] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 李林立. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异——以云南小江流域为例[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2 040-2 047
- [17] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 64-67
- [18] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217
- [19] 任春颖, 张柏, 王宗明, 宋开山, 刘殿伟. 松嫩平原西部土壤有机碳空间变异研究——以吉林省通榆县为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 631-636
- [20] Priess JA, Koning GHJde, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador[J]. Agriculture Ecosystem and Environment, 2001, 85: 269-279
- [21] Dalal RC, Mayer RJ. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland, IV. Loss of organic carbon from different density fractions[J]. Australia Journal Soil Research, 1986, 24: 301-309
- [22] Burke IC, Yonker CM, Ponton WJ, Cole CV, Flach K, Schimel DS. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U S Grass-land soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 800-805
- [23] Hontoria C, Rodriguez Murillo JC, Saa A. Relationship between soil organic carbon and site characteristics in Peninsular Spain[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 614-621
- [24] Nichols JD. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern Great Plains[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48: 1 382-1 384
- [25] 佟小刚. 长期施肥下我国典型农田土壤有机碳库变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008
- [26] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 刘红梅, 张瑞, 姬艳艳, 杨殿林. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359-365
- [27] 张四伟, 张武益, 王梁, 朱利群, 顾克军, 章红运, 卞新民. 耕作方式与秸秆还田对麦田土壤有机碳积累的影响[J]. 江西农业学报, 2012, 24(8): 6-9
- [28] Doran JW. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[M]. Wisconsin, USA: Soil Sci. Soc. Am., Inc., 1994: 193-200
- [29] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 李洪杰, 仲惟磊, 李增驾. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373-378

Spatial Variation and Influencing Factors of SOC Content of Tillage Layer in Jianghuai Hilly Region

——A Case Study of Dingyuan County, Anhui Province

MA Yu-xin^{1,2}, LI Xu-sheng^{1*}, LI De-cheng^{2*}, HAN Zhi-yong¹, ZHANG Gan-lin²,
ZHANG Zhao-dong³, WANG Li-li³

(1 *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 3 *Soil and Fertilizer Station of Dingyuan County, Chuzhou, Anhui 233200, China*)

Abstract: In this study the soil samples were collected from Dingyuan County of Jianghuai hilly region. The spatial distribution and variability of soil organic carbon (SOC) contents in 2011 were analyzed by using the means of statistics, geostatistics and geographical information system (GIS). The result showed that the SOC contents in the county ranged from 1.10 to 33.72 g/kg with an average of 10.96 g/kg, and the coefficient of variation was 33.12%, belonged to the moderate degree of variation. The SOC semivariance model was exponential model. Moreover, there was a strong spatial autocorrelation of SOC content. From east to west SOC contents decreased first then increased in spatial distribution, and soil particle size fractions and the straw returning to the field were the main factors that influenced the spatial variability of SOC.

Key words: Soil organic carbon(SOC), Spatial variability, Soil particle size fractions, Straw returning to field