

江西省不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应¹

张文婷

(长安大学建筑学院, 陕西西安 710061)

【摘要】: 运用地统计学、地理信息系统、方差分析和回归分析相结合的方法, 研究江西省不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应, 尺度分为省域尺度、完整地貌单元尺度和完整地貌单元相对应的县域尺度。结果表明: (1) 不同尺度下耕地土壤有机碳均值差异显著, 变异系数基本不变; (2) 从县域尺度到地貌单元尺度再到省域尺度, 块金效应值和空间自相关距离呈增大趋势; (3) 不同尺度土壤有机碳空间分布级别和面积比例差异明显, 小尺度插值图信息更丰富; (4) 方差分析和回归分析结果表明秸秆还田、成土母质、土壤类型、高程和土壤侵蚀对土壤有机碳空间变异存在显著影响, 但不同尺度下影响程度有所差异。秸秆还田和土壤类型对土壤有机碳空间变异的影响不存在尺度效应, 成土母质、高程和土壤侵蚀对其影响存在尺度效应。结果可为详细地理解不同尺度下土壤有机碳空间变异及估测土壤有机碳密度提供一定的参考依据。

【关键词】: 江西省 地貌单元 土壤有机碳 空间变异 尺度效应

【中图分类号】: S153.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 11-2619-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201811023

土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 是陆地土壤碳库的重要组成部分, 也是反映土壤肥力状况的重要指标, 其空间变化不仅影响耕地生产力和土壤肥力, 而且影响着大气 CO₂ 浓度和全球碳循环过程^[1]。由于受五大成土因素以及人为活动的共同作用, 导致土壤有机碳在空间分布上呈现非均一性, 致使其存在明显的区域、时空和尺度效应^[2]。长期以来, 随着 3S 技术和变异函数分析组合应用以来, 国内外学者对单一区域、时空和尺度下土壤有机碳空间变异做了大量研究^[3]。多数仅关注不同区域或时空上土壤有机碳变化, 少数涉及不同尺度下的研究^[4]。同一区域中, 由于不同尺度下土壤有机碳自相关程度差异大, 变异函数的随机成分也在不断变化, 单一尺度的结构特征将被掩盖, 不利于精确地分析土壤有机碳的空间变异特征及其影响因素^[5]。因此, 迫切需要了解土壤有机碳在不同尺度下空间变化规律。

近年来, 对于土壤有机碳多尺度效应, 众多学者进行了大量研究^[6-8]。张志霞等^[6]对黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应进行研究, 发现不同尺度下土壤有机碳含量信息丰缺程度不一, 影响因素也存在明显的尺度效应。赵明月等^[7]对沐浴小流域和安塞集水区两个尺度上土壤有机碳与影响因素相关性进行研究, 表明不同尺度土壤有机碳与影响因素的相关性不同, 甚至出现相反的现象。刘世梁等^[8]分析小流域和县域尺度上土壤有机质空间变异, 认为尺度扩大了地形和土地利用对土壤有机质空间异质性的影响程度。前人研究表明, 不同尺度下土壤有机碳空间变异的影响因素不尽相同, 即使在同一区域的相同因素, 在不同空间位置下土壤有机碳空间异质性也存在差异^[9, 10]。为调控土壤碳恢复、累积与循环, 需要在世界不同区域对

¹收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51208054); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (310821153402)

作者简介: 张文婷 (1989~), 女, 博士, 讲师, 主要从事交通规划和城市景观方面的研究。E-mail: zhangwenting1007@126.com

土壤有机碳空间变异的尺度效应进行研究，尤其是在生态环境与耕地质量面临着可能下降的南方红壤区典型的农业大省——江西省^[11]。

国内外学者报道了不同区域、尺度和时空下影响土壤有机碳空间变异的影响因素^[2,3,6⁻¹⁰]，包括高程、成土母质、土壤类型、耕地利用方式、秸秆还田方式和其它人为活动。这些因素可以分为两类：随机性因素（包括秸秆还田方式和其它人为活动等）和结构性因素（高程、成土母质和土壤类型等）。但影响因素仅为定性影响，量化定性因素对不同尺度下土壤有机碳空间变异的相对贡献有利于精确地描述土壤有机碳空间变异规律和调控土壤碳循环^[11]。地统计学方法已经被证实是一种有用且高效的方法来确定这两类因素的相对重要性^[12]，基于半变异函数的理论模型分析，进一步插值出土壤有机碳空间分布。

江西省地处中国东南部，是中国的农业大省，也是中国从未间断向外输出粮食的两个省份之一^[12]。该区地貌类型多变，环境较为复杂，不同地貌单元是导致耕地土壤有机碳具有较强空间自相关性和异质性的的重要因素^[13]。目前专门针对该区不同地貌单元耕地土壤有机碳的空间变异性研究尚不多见，且较少有研究涉及不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应。因此，本文以江西省耕地土壤有机碳为研究对象，研究不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应，试图揭示不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异特征及其在不同尺度下的差异性，以期为进一步理解不同尺度下土壤有机碳空间变异性以及空间变异的尺度效应转换提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

江西省地理坐标介于 24° 29' 14"~30° 04' 41"N, 113° 34' 36" ~118° 28' 58"E 之间，总面积为 1.67x10⁵km²，人口 4566 万，辖 11 个地级行政区。年平均气温 20~30℃，雨量充沛，年均降水量 1340~2000mm；全年无霜期约 240~300d，为亚热带湿润气候。省内东、西、南三面环山，东部及东北部有怀玉山和武夷山脉，西部及西北部有幕阜山、九岭山、武功山、罗霄山脉，南部及西南部有万洋山、诸广山、大庾岭、九连山脉，高度一般为海拔 1000~1500m，武夷山的主峰黄冈山高达 2195m，为全省最高峰。中部丘陵、盆地相间；北部平原坦荡，江湖交织，有我国第一大淡水湖——鄱阳湖及湖区平原。全省地势由东、南、西三面逐渐向鄱阳湖倾斜，构成一个向北开口的巨大盆地。地貌类型以山地、丘陵为主，兼有平原、岗地。山地面积占全省土地总面积的 36%，丘陵占 42%，岗地、平原、水面占 22%。土地利用类型以耕地和林地为主^[12]，其中耕地面积为 3.09x10⁶hm²，主要分布地势较低或鄱阳湖平原区，赣江、抚河和饶河等长江支流沿岸分布也较为集中，赣南山地区耕地分布较为分散和破碎。

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》采集于 2012 年 11 月至 2013 年 2 月，在考虑空间分布均匀性和样点代表性的前提下，每个采样点采集 4 个点进行充分混合，用四分法留取 1kg 土样，并运用 GPS 记录该样点经纬度，同时详细记录该样点土壤类型、成土母质、耕地利用方式和秸秆还田等信息，共采集耕地表层（0~20cm）土壤样点 16582 个（图 1（a））。土壤样品经过自然风干后，在实验室磨碎过筛，采用重铬酸钾（K₂Cr₂O₇）油浴加热测定土壤有机碳含量^[12]。

1.3 尺度划分

本文将江西省划分为 3 个尺度（表 1）：省域尺度（C）、地貌单元尺度（A）以及与地貌单元对应的县域尺度（B）。其中，地貌单元根据江西省地形地貌特征分区划分为 4 个地貌单元：鄱阳湖平原区（A1）、赣中丘陵区（A2）、赣北丘陵山地区（A3）和赣南山地区（A4）。鄱阳湖平原区基本特征：地势平坦，水域广阔，水土条件优越，耕地面积比重较大，粮食地位突出。赣中丘陵区基本特征：属罗霄山脉中段，东西南三面环山，地形以丘陵为主，盆地谷地低平宽广，林地和耕地面积比重较大，农业综合开发潜力较大。赣北丘陵山地区基本特征：地势东高西低南高北低，北东向岭谷相间排列，区内地形以丘陵山地为主，主要

有幕阜、九岭、怀玉和武夷四大山脉，降水充沛，森林资源比较丰富。赣南山地区基本特征：地处赣江上游，区内以山地为主，武夷山、南岭山和罗霄山脉的交汇地带，地形起伏较大，降水充沛，水土流失相当突出，近 20a 综合治理成效显著。县域尺度也由四部分组成，本文选择 4 个地貌单元的代表性县：鄱阳湖平原区的南昌县（B1）、赣中丘陵区的泰和县（B2）、赣北丘陵山地区的上饶县（B3）和赣南山地区的信丰县（B4）。

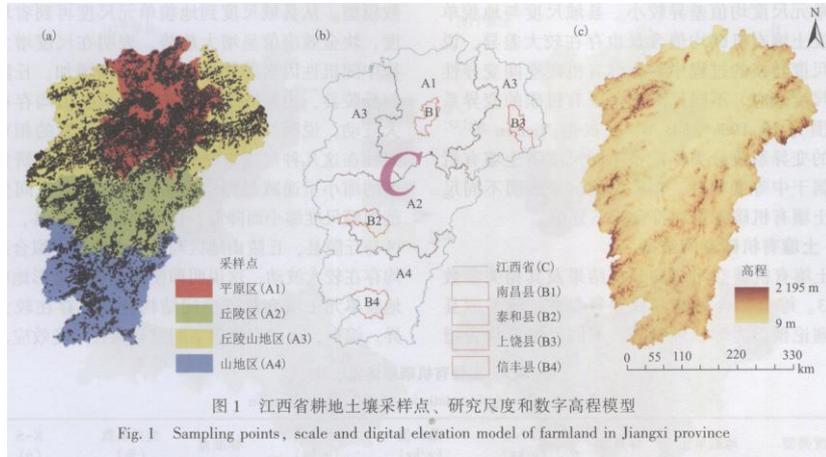


图 1 江西省耕地土壤采样点、研究尺度和数字高程模型
Fig. 1 Sampling points, scale and digital elevation model of farmland in Jiangxi province

表 1 不同尺度划分

Tab. 1 Divided by different scales

省域尺度	地貌单元尺度	地貌单元对应的县域尺度
江西省 (c)	鄱阳湖平原区 (A1)	南昌县 (B1)
	赣中丘陵区 (A2)	泰和县 (B2)
	赣北丘陵山地区 (A3)	上饶县 (B3)
	赣南山地区 (A4)	信丰县 (B4)

1.4 数据处理与研究方法

受采样及实验室分析误差的影响，土壤有机碳含量测量结果存在异常值，从而对土壤有机碳空间总体分布与统计分析产生影响。本文采用域值法(3 倍的标准差)对采样点数据的土壤有机碳含量异常值进行剔除 [13]，得到剔除后总样点为 16109 个，本文相关研究均采用剔除异常值后的数据。

描述性统计分析显示了不同尺度土壤有机碳均值和范围上的变异^[14]，但只能描述其含量变化的总体趋势，不能揭示其空间结构特征^[15]，运用 GS+软件对研究区土壤有机碳数据进行空间结构分析。在空间结构分析的基础上运用普通克里格法对土壤有机碳进行空间插值，进而得到其空间分布^[12,14]，空间分辨率均设定为 30m。根据 20 世纪 80 年代中国第二次土壤普查土壤有机质含量分级标准和有机质与有机碳的转换系数(1.724)^[16]，土壤有机碳被分为 6 个级别：一级(>24.0g/kg)、二级(18.0~24.0g/kg)、三级(12.0~18.0g/kg)A 四级(6.0~12.0g/kg)、五级(3.5~6.0g/kg)和六级(<3.5g/kg)。

基于全省 1:10 万的地形图生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM, 图 1(c))。高程由 DEM 在 ArcGIS10.2 软件中处理提取 [14]。在方差分析中，成土母质、土壤类型、秸秆还田和土壤侵蚀为定性变量，成土母质分为 10 组：第四纪红色粘土、河湖沉积物、红砂岩类风化物、泥质岩类风化物、石英岩类风化物、酸性结晶岩类风化物、碳酸岩类风化物、下蜀系黄土状物和紫色岩类风化物；土壤类型分为 5 组：水稻土、红壤、黄褐土、石灰土和潮土；秸秆还田分为 3 组：秸秆不还田、秸秆翻压还田和秸秆覆盖还田；土壤侵蚀分为 6 组^[16]：无明显侵蚀、轻微侵蚀、中度侵蚀、重度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀。在

回归分析中，成土母质、土壤类型、秸秆还田和土壤侵蚀采用虚拟变量^[12-15]对分组变量进行赋值，从而实现对定性因素的定量分析。

2 结果与分析

2.1 描述性统计特征

描述性统计分析结果表明(表 2)，不同尺度下土壤有机碳均值差异显著。从县域尺度来看，丘陵县与丘陵山地区均值显著大于山地区。从地貌单元尺度来看，丘陵山地区均值最高，为 18.33g/kg；山地区均值最低，为 16.96g/kg。平原区、丘陵区 and 丘陵山地区均值之间无显著差异，但均显著高于山地区。从省域尺度来看，土壤有机碳均值处于中等水平，与县域尺度均值含量差异较大但与地貌单元尺度均值差异较小。县域尺度与地貌单元尺度土壤有机碳均值含量也存在较大差异，说明在尺度转换的过程中，土壤有机碳空间变异性存在尺度效应。不同尺度下土壤有机碳的变异系数范围为 28.19%–34.34%，根据 Nielsen 等^[17]提出的变异系数分类标准，不同尺度下土壤有机碳均属于中等变异性。K-S 检验结果表明不同尺度下土壤有机碳含量均符合正态分布。

表 2 土壤有机碳描述性统计
Tab. 2 Descriptive statistics of soil organic carbon

尺度类型	地貌单元	样点数	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	平均值 (g/kg)	标准差	变异系数 (%)	K-S (?)
县域	B1	354	7.66	33.76	19.51A	5.50	28.19	0.32
	B2	377	7.42	33.76	17.83BCDE	5.47	30.68	0.58
	B3	182	7.25	32.08	17.01EF	5.24	30.81	0.63
	B4	325	7.02	34.22	15.20G	5.22	34.34	0.17
地貌单元	A1	6031	5.22	35.44	17.92BC	5.61	31.31	0.40
	A2	3151	7.13	40.31	18.04B	5.30	29.38	0.35
	A3	4389	7.02	39.73	18.33B	5.69	31.04	0.38
	A4	2538	7.01	35.44	16.96F	5.40	31.84	0.43
省域	C	16109	5.22	40.31	17.90BCD	5.55	31.01	0.35

注：不同类型间均值无相同字母表示差异显著(p<0.01)。

表 3 土壤有机碳的半变异函数参数

Tab. 3 Semivariance parameters of soil organic carbon

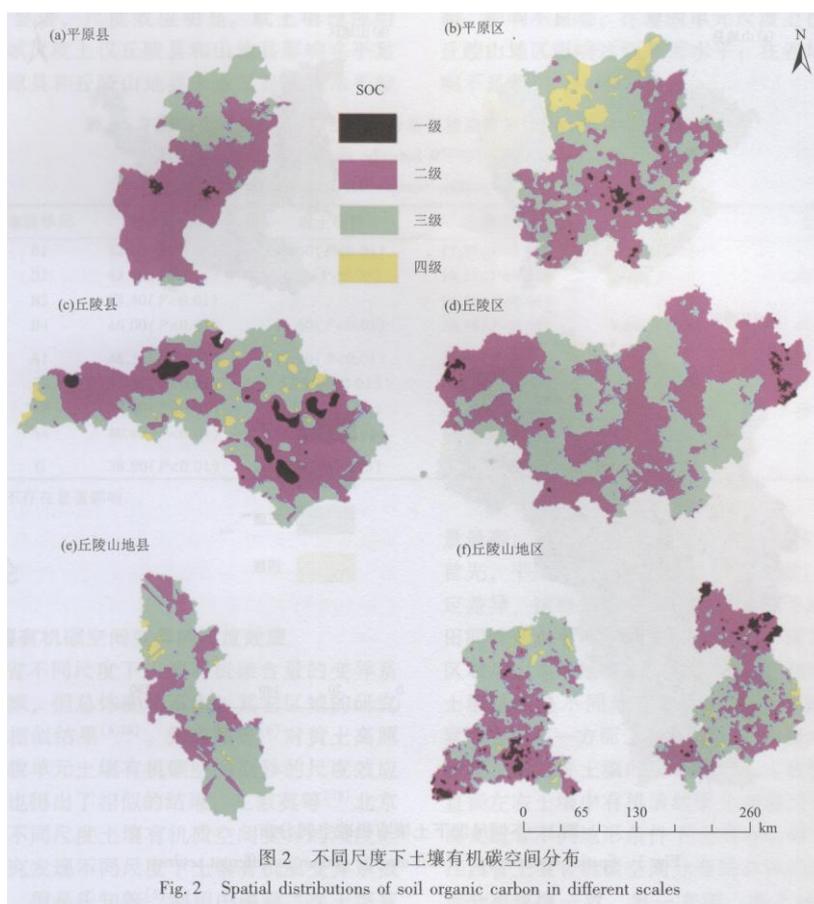
尺度类型	地貌单元	模型	块金值	基台·值	块金效应 (%)	变程 (km)	决定系数	残差
县域	B1	球状	13.99	30.77	45.47	4.53	0.752	0.588
	B2	指数	10.85	30.62	35.43	8.28	0.926	0.295
	B3	指数	14.67	26.77	54.80	2.70	0.333	0.468
	B4	指数	11.38	27.22	41.81	4.89	0.834	0.292
地貌单元	A1	指数	22.02	42.25	52.12	56.25	0.971	0.005
	A2	指数	15.06	25.99	57.95	12.60	0.487	0.437
	A3	指数	17.16	32.04	53.56	18.30	0.571	0.231
	A4	指数	16.84	29.46	57.16	29.10	0.829	0.151
省域	C	指数	22.86	30.91	73.96	30.60	0.713	1.470

2.2 土壤有机碳空间结构

土壤有机碳空间结构分析结果及其相关参数见表 3。综合拟合系数和残差等参数，除平原县最优理论模型为球状模型外，不同尺度下均为指数模型。从县域尺度到地貌单元尺度再到省域尺度，块金效应值呈增大趋势，表明在尺度增大过程中随机性因素的影响程度在逐渐增加。丘陵区与丘陵县，山地区与山地县块金系数值均存在较大波动，说明结构性因素与随机性因素的相对重要性在这几种尺度中变化较大。变程随着研究尺度的缩小呈递减趋势，表明土壤有机碳空间变异范围随尺度缩小而降低。在平原区与平原县，丘陵区与丘陵县，丘陵山地区与丘陵山地县，拟合系数均存在较大波动，这说明即使具有相似地形地貌的地貌单元土壤有机碳空间结构特征也存在较大差异。综上，土壤有机碳空间变异存在尺度效应。

2.3 土壤有机碳空间分布

平原县与平原区的空间分布总体趋势是南部高于北部（图 2a 和图 2b）。丘陵县的空间插值图表明土壤有机碳分布较为破碎，存在较多低级别区域包含的高级别部分（或高级别区域包含的低级别部分），反映的信息量多；而丘陵区土壤有机碳较为平滑，信息量较少（图 2c 和图 2d）。丘陵山地县与丘陵山地区的空间分布均较为破碎（图 2e 和图 2f）。从山地县与山地区的空间分布可以看出（图 3a 和图 3b），土壤有机碳不同级别比例有所不同。从省域尺度上看（图 3c），土壤有机碳含量空间分布表现出西北部和东南部要低于中部的总体趋势，这与江西省东、西、南三面环山地形变化规律一致；高值区域主要分布在鄱阳湖平原区南部、赣中丘陵区和赣东北丘陵山地区，低值区域主要分布在鄱阳湖平原区北部和赣南山地区。



县域尺度上，不同级别空间分布和面积比例差异明显（表 4）。平原县和丘陵县的二级面积所占比例最大；丘陵山地县和山地县三级面积所占比例最大。地貌单元尺度上，平原区、丘陵区和丘陵山地区二级和三级面积所占比例相当，而山地区二级和

三级所占比例差异明显。省域尺度上，二级和三级面积所占比例相当，一级和四级所占比例较少，总体水平较高，与描述性统计分析结果一致（表 2）。从不同级别上来看（表 4），不同尺度下土壤有机碳含量均较高，不存在五级和六级含量。

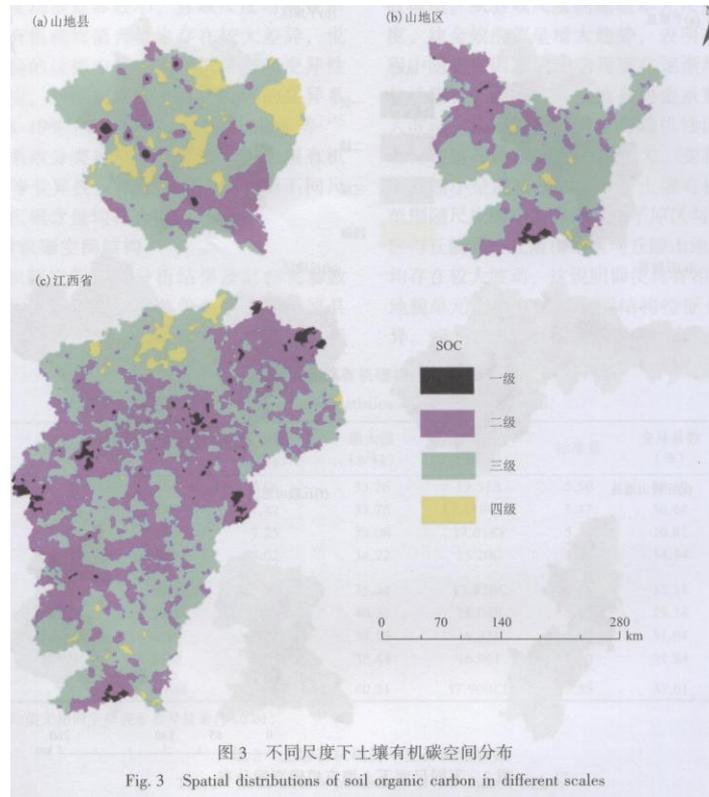


表 4 土壤有机碳空间分布各级别面积比例 (%)

Tab. 4 Spatial distribution of soil organic carbon with the percentage of grading areas (%)

尺度类型	地貌单元	一级	二级	三级	四级	五级	六级
县域	B1	1.39	67.86	30.75	0.00	0.00	0.00
	B2	5.72	47.41	43.58	3.29	0.00	0.00
	B3	0.03	30.83	66.67	2.47	0.00	0.00
	B4	0.86	20.86	62.13	16.15	0.00	0.00
地貌单元	A1	2.40	45.51	44.16	7.93	0.00	0.00
	A2	1.39	54.20	44.41	0.00	0.00	0.00
	A3	5.22	45.02	47.43	2.33	0.00	0.00
	A4	1.27	33.44	63.37	1.92	0.00	0.00
省域	C	2.39	46.35	48.50	2.76	0.00	0.00

2.4 影响土壤有机碳空间变异尺度效应的因素

从表 5 可以看出：县域尺度上，平原县的影响因素主要是秸秆还田、成土母质、土壤类型和高程；丘陵县和丘陵山地县的影响因素主要是秸秆还田和土壤类型；秸秆还田、成土母质、土壤类型、高程和土壤侵蚀均会对山地县土壤有机碳空间变异产生影响。地貌单元尺度上，平原区的主要影响因素为秸秆还田、成土母质和土壤类型。丘陵区的主要影响因素为秸秆还田、土壤类型、高程和成土母质。丘陵山地区的主要影响因素为秸秆还田、土壤类型、成土母质和土壤侵蚀；山地区的主要影响因素为秸秆还田、土壤类型、高程和成土母质。省域尺度上，土壤有机碳空间变异主要影响因素为秸秆还田、高程和土壤类型。

表 5 表明不同因素在不同尺度下对土壤有机碳空间变异的影响程度存在差异。就秸秆还田而言,不同尺度下秸秆还田对土壤有机碳空间变异影响均显著,影响程度介于 33.20%~46.00%之间,尺度效应不明显。就成土母质而言,尺度效应明显,在县域尺度上仅平原县和山地县呈极显著影响,而丘陵县为显著影响,丘陵山地县影响不显著;在地貌单元尺度上均呈极显著影响;在省域尺度上影响显著。就土壤类型而言,不同尺度下土壤类型对土壤有机碳空间变异影响均达到极显著水平,影响程度介于 5.10%~20.36%之间,尺度效应不明显。就高程而言,在县域尺度上仅平原县和山地县呈极显著影响,而丘陵县和丘陵山地县影响未达到显著水平;在地貌单元尺度上丘陵区 and 山地地区达到极显著影响水平,平原和丘陵山地县影响程度不显著;在省域尺度上影响水平极显著,尺度效应明显。就土壤侵蚀而言,在县域尺度上仅丘陵县和山地县影响水平显著,而平原县和丘陵山地县未通过显著性水平检验,影响不显著;在地貌单元尺度上仅平原区和丘陵山地区影响达到显著水平;在省域尺度上影响不显著;尺度效应明显。

表 5 不同因素对土壤有机碳的回归分析调整决定系数(%)和方差分析概率水平

Tab. 5 Regression analysis adjusted R^2 (%) and the probability level of variance analysis of soil organic carbon with affecting factors

尺度类型	地貌单元	秸秆还田	成土母质	土壤类型	高程	土壤侵蚀
县域	B1	42.60(P<0.01)	15.60(P<0.01)	17.85(P<0.01)	11.29(P<0.01)	/
	B2	43.10(P<0.01)	1.20(P<0.05)	19.11(P<0.01)	/	2.40(P <0.05)
	B3	33.40(P<0.01)	/	14.62(P<0.01)	/	/
	B4	46.00(P<0.01)	12.60(P<0.01)	20.36(P<0.01)	9.80(P <0.01)	5.40(P<0.05)
地貌单元	A1	46.50(P<0.01)	17.20(P<0.01)	10.56(P<0.01)	/	1.11(P<0.05)
	A2	33.20(P<0.01)	5.00(P<0.01)	11.46(P<0.01)	8.29(P<0.01)	/
	A3	37.00(P<0.01)	7.20(P<0.01)	20.23(P<0.01)	/	3.60(P<0.05)
	A4	40.40(P<0.01)	10.50(P<0.01)	15.96(P<0.01)	11.97(P<0.01)	/
省域	C	38.90(P<0.01)	2.60(P<0.05)	5.10(P <0.01)	9.49(P <0.01)	/

注:“/”表示不存在显著影响。

3 讨论

3.1 土壤有机碳空间变异的尺度效应

江西省不同尺度下土壤有机碳含量的变异系数有增有减,但总体变化不大,其它区域的研究也得出了相似结果^[6, 18]。张志强等^[6]对黄土高原区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应进行研究也得出了相似的结果。王淑英等^[18]北京市平谷区不同尺度土壤有机质空间变异的尺度效应进行研究发现不同尺度下土壤有机质变异系数基本不变。但吴乐知等^[5]利用中国第二次土壤普查数据研究认为:变异系数随着空间尺度的增大而下降。其原因可能是所选取样点的代表性问题,国家尺度采用二次土壤普查数据(2473),由于当时采样并不按照行政区均匀布点,各区域有效样本差异较大;而江西省采用 2012 年测土配方时期样点(16109),样点采样方式更趋合理,各区域有效样本数差异较小。

江西省不同尺度下耕地土壤有机碳均值差异显著,土壤有机碳空间变异较为复杂,这是因为土壤有机碳很容易受秸秆还田,氮肥施用,耕作方式和田间管理水平的影响^[12, 15]。林飞燕等 M 对江西农田土壤固碳潜力进行监测发现秸秆还田和耕作方式(翻耕)是影响土壤中碳含量的主要因素;江叶枫等^[12]研究表明江西省耕地土壤有机碳变异主要受秸秆还田和氮肥施用量的影响;这与本研究结果一致。在县域尺度上,平原县均值含量最高;而在地貌单元尺度上山地区均值最低。首先,平原区与山地区在秸秆还田量(率)存在一定差异,这也是由于不同地形地貌下地形条件和田间管理水平所导致的。其次,本研究所选取的区域均为地形地貌所主导的典型县与区,高程和土壤侵蚀是不同地貌单元所区分的重要参考因素^[6, 12~14]。一方面,高程间接支配着水热资源的分配,影响着土壤的发育程度;水热资源的分配直接左右土壤中有机质的矿化和腐殖化过程,从而支配着不同地形条

件下土壤有机碳含量,使得江西省土壤有机碳空间分布的总体趋势与该区地形分布规律一致。另一方面,由于地形的变化,不同地貌单元所主导区域主要是土壤侵蚀与土壤类型的不同,通过对江西省土壤类型与土壤侵蚀图(水利部调查的江西省土壤侵蚀图)进行叠加,发现土壤侵蚀程度较轻的区域主要是平原和高程较低区域,由于精耕细作和农业管理水平较高导致该区域土壤有机碳含量较高,而侵蚀程度较重的区域主要是赣南山地区和江西省东、南、西三面高程较高处,尤以兴国县为代表,石砾含量较高、有机质含量较低并且土层较薄的石灰土和粗骨土成为主导土类,土壤有机碳含量下降^[16]。

空间尺度具有明确的地学含义。尺度越大,空间范围越大,显示差异的影响因素也更概括和抽象。吴乐知等^[5]研究中国土壤有机质含量变异与空间尺度的关系,表明同一区域内土壤有机质的变异系数会随着土壤剖面数量的增加而增大,大尺度的空间变异以小尺度为基础,小尺度内部的空间变异被掩盖,变异程度随尺度扩大而降低。因此,样点数的增加和尺度的缩小有利于更加精确地描述土壤有机碳空间变异特征。在大尺度中应用小尺度的影响因素,会由于其影响过于微弱而被概括,再加上尺度变化带来的过程复杂化,造成大尺度区域与小尺度中影响因素的显著性与影响程度降低甚至丧失。

目前,我国省域尺度上土壤有机碳储量估算研究所采用的土壤剖面数据大多来源于第二次土壤普查中的省级汇总资料^[20],如各省下属县市编制的土种志,研究大多是在某一土壤制图单元级别(如土种、土属、亚类、土类)上进行土壤有机碳的估算,鲜有考虑不同尺度对土壤有机碳储量估算结果影响的报道。因此,在不同区域和尺度下对土壤有机碳的储量估算中,更应考虑与尺度匹配的影响因素,其中包括成土母质、高程和土壤侵蚀。此外,由于自然因素中的地貌部位、沉积物类型、灌溉水源以及农田基本设施、耕作制度以及灌溉方式等田间管理措施对土壤有机碳的影响也是一个不可忽略的因素。

3.2 土壤有机碳空间变异的影响因素

土壤有机碳空间变异由随机性因素(如秸秆还田)与结构性因素(如成土母质)共同控制,随机性因素减弱了土壤有机碳空间依赖性而结构性因素增强了空间依赖性^[16]。在县域尺度上,土壤有机碳块金效应值介于25%~75%之间,根据Cambardella^[21]关于块金效应值的划分,县域尺度上呈中等空间依赖性,除丘陵山地县土壤有机碳空间变异受随机性因素影响要大于结构性因素外,其它县均为受结构性因素影响大于随机性因素。在地貌单元尺度上,土壤有机碳均呈中等空间依赖性,空间变异受随机性因素影响要大于结构性因素。在省域尺度上,土壤有机碳块金效应值为73.96%,呈中等空间依赖性,空间变异受随机性因素影响大于结构性因素。从表3可以看出,随着尺度的扩大,土壤有机碳的空间自相关距离呈增大趋势,这与其他区域研究结果基本一致^[6],如张志霞等^[6]在研究地貌单元尺度下有机碳的变程为17.7km,而在县域尺度上黄土丘陵区土壤有机碳空间变异空间自相关距离为18.8km,主要原因可能是在县域尺度下地貌类型多样,沟壑纵横,海拔差异较大,而在地貌单元尺度下,除高山区外,其他地貌单元地形都较破碎,而在较小研究尺度下,所选的行政区域比较完整,地貌类型单一,自然条件趋于一致,人为管理措施相差不大;另一方面原因可能与本研究所选取样点的间距与数量级别在各个尺度下是一致的有关。变异系数均基本不变(表2),说明耕地土壤有机碳的空间差异在缩小,更趋向一致性。

从回归分析和方差分析可以看出(表4),秸秆还田、成土母质、土壤类型、高程和土壤侵蚀等均在不同程度和尺度下对土壤有机碳含量空间变异存在影响,但秸秆还田和土壤类型的尺度效应不明显,不同尺度下影响显著且差异相对较小。究其原因,自20世纪80年代中国实行家庭联产承包制度以来^[15],农户的生产积极性迅速提高,江西省作物生产就由此从传统的仅仅依赖土壤自身肥力与有限的有机肥转变到使用化肥与秸秆还田中来,由于秸秆还田不仅能为土壤微生物提供丰富的碳源,且能促使集约化高氮输入的农田生态系统维持正常的碳氮比例,改善土壤结构板结和连作障碍等现象,中国秸秆还田率在50%左右^[22];土壤类型表示土壤经成土过程形成后的土壤种类,红壤多由老冲积物发育而来,土壤性质较稳定,江西省耕地土壤类型56%以上为红壤;二者在不同区域和尺度下均变化较小(表5),因此尺度效应不明显。而成土母质、高程和土壤侵蚀尺度效应明显,不同尺度下影响程度和显著性有所不同。高程是不同地貌单元所区分的重要参考因素,同时不同地形地貌特征将进一步导致土壤侵蚀程度的差异性,因此二者均有明显的尺度效应^[6]。成土母质代表土壤形成过程中的物质基础^[16,22],第四纪红色粘土由质地黏细的颗粒经一般风化过程沉积而成,土壤保水保肥能力较强;河湖沉积物主要由河流和湖泊搬运堆积而成,常含水生动植物残体,土壤营养元素含量较高;泥质岩类风化物主要由细砂粒发育而来,矿物质营养相对丰富,土壤养分累积能力一般^[23];江西

省成土母质涉及种类复杂^[13], 各个县域尺度和地貌单元尺度上成土母质种类不一, 成土母质尺度效应明显。

4 结论

江西省耕地土壤有机碳空间变异存在尺度效应, 不同地貌单元耕地土壤有机碳均表现为中等变异性。随着尺度的变化, 秸秆还田和土壤类型对耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应不明显; 成土母质、高程和土壤侵蚀对其尺度效应明显。

致谢: 感谢江西农业大学江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室的江叶枫对本文数据获取、分析和论文写作做出的帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] PIRES C V, CERGI S, HASHIGUSHI A K, et al. Soil organic carbon and nitrogen pools drive soil C-CO₂ emissions from selected soils in Maritime Antarctica [J]. Science of the Total Environment, 2017, 596-597: 124-135.
- [2] WANG X, PUL, ZHANG M, et al. Spatial and temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen pools in the coastal reclamation area, eastern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6) : 4763-4769.
- [3] MEERSMANS J, RIDDER F D, CANTERS F, et al. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium) [J]. Geoderma, 2008, 143(1): 1-13.
- [4] STEVENS F, BOGAERT P, WESEMAEL B V. Spatial filtering of a legacy dataset to characterize relationships between soil organic carbon and soil texture [J]. Geoderma, 2015, 237-238: 224-236.
- [5] 吴乐知, 蔡祖聪. 中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 965-972.
- WU L Z, CAI Z C. The relationship between the spatial scale and the variation of soil organic matter in China [J]. Progress in Geography, 2006, 21(9) : 965-972.
- [7] 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(7) : 1173-1184.
- ZHANG Z X, XU M X, SHI C D, et al. Scaling effect on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the Loess Hilly Region [J] • Journal of Natural Resources, 2014, 29(7): 1173-1184.
- [7] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例 [J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1105-1113.
- ZHAO M Y, ZHAO W W, ZHONG L N. Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon: a case study in the hilly and gully area of Northern Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (5) : 1105-1113.
- [8] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析——以横山县为例 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(5) :

105-108.

LIU S L, GUO X D, LIAN G, et al. Multi-Scale analysis of spatial variation of soil characteristics in Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005 , 19(5): 105 - 108.

[9] XIN Z, QIN Y, YU X. Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2015, 137.

[10] CONANT R T, PAUSTIAN K. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(116 Suppl 1) : S127-S135.

[11] XIE H, PENG W, HUANG H. Ecological Risk Assessment of Land Use Change in the Poyang Lake Eco - economic Zone, China [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2013, 10(1) : 328-346.

[12] 江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间 变异特征及其影响因素 U]. 环境科学, 2017, 38(9): 3840-3850.

JIANG Y F, GUO X, SUN K, et al. Spatial variability of farm-land soil C/N ratio of Jiangxi Province [J]. Environmental Science, 2017, 38(9) : 3840-3850.

[13] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化 学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527-1539.

JIANG Y F, YE Y C, GUO X, et al. Spatial variability of eco-logical stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farm-lands of Jiangxi Province and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6) : 1527-1539.

[14] LI Q Q, LUO Y L, WANG C Q, et al. Spatiotemporal variations and factors affecting soil nitrogen in the purple hilly area of Southwest China during the 1980s and the 2010s[J]. Science of the Total Environment, 2016, 547: 173-181.

[15] JIANG YF, RAO L, SUN K, Y, et al. Spatio-temporal distribution of soil nitrogen in Poyang lake ecological economic zone (South-China) [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 235-243.

[16]江叶枫,孙凯,郭熙,等.南方红壤区不同侵蚀程度下 土壤有机质空间变异的影响因素研究[J].自然资源学报,2018,33(1):149-160.

JIANG YF, SUN K, GUO X, et al. Spatial variability of organic matter and its influencing factors in red soil with different erosion degrees in South China[J] • Journal of Natural Resources, 2018, 33(1) : 149-160.

[17] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability: proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas, USA, 30 November-December, 1984. Pudoc, 1985.

[18] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 不同研究尺度下土壤有机质 和全氮的空间变异特征——以北京市平谷区为例 U]. 生态学报, 2008, 28(10) : 4957-4964.

WANG S Y, LU P, WANG J L, et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu County, Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10) : 4957-4964.

[19] 林飞燕, 吴宜进, 王绍强, 等. 秸秆还田对江西农田土壤固碳影响的模拟分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 981-993.

LIN F Y, WU Y J, WANG S Q, et al. Simulation and prediction of straw return on soil carbon sequestration potential of crop-land in Jiangxi province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(6) : 981-993.

[20] 支俊俊. 浙江省土壤有机碳估算及其尺度效应研究[D]. 浙江大学, 2014.

ZHI J J. Estimating soil organic carbon stocks and its scale effects: a case study in Zhejiang Province[D]. Zhejiang University ,2014.

[21] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, PARKIN T B, et al. Field - Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.

[22] 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.

PAN J L, DAI W A, SHANG Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2013 , 21(5): 526 - 535.

[23] KOUMAN A M, JONGEJANS J, SEVINK J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain[J]. *Catena*, 2005, 59(1) : 55-68.