

黄淮海农业区旱地土壤有机碳变异性的空间尺度效应^①

王美艳^{1,2}, 史学正^{1*}, 于东升¹, 徐胜祥¹, 檀满枝¹, 赵永存¹

(1 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; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤有机碳(SOC)具有空间变异性, 其变异程度依赖于空间尺度, 多尺度研究 SOC 变异性特征及其对空间尺度拓展的响应对精确估算土壤碳储量具有重要意义。本研究以黄淮海农业区为研究区域, 利用全国第二次土壤普查资料记录的 1 875 个土壤剖面, 设定 4 级行政区尺度, 即大区、省级、市级和县级, 研究了不同土壤深度(0~20、20~30、30~50、50~70 和 70~100 cm)有机碳含量的变异性特征及其对行政区尺度拓展的响应。研究结果表明: 黄淮海农业区 SOC 含量变异系数均值随着行政区尺度的增大和土壤深度的增加而增大, 范围为县级尺度 0~20 cm 表层的 33.68% 到大区尺度 70~100 cm 底层的 81.02%; 两行政区尺度间的跨度越大, 其变异性越大, 尺度间变异性呈明显的阶梯状, 表现为 3 个尺度等级(大区-县级)> 2 个尺度等级(省级-县级和大区-市级)> 1 个尺度等级(省级-市级, 市级-县级和大区-省级); SOC 含量变异系数均值与行政区面积为显著对数关系 $y = a + b \times \ln(x)$, 随着土壤深度的增加, SOC 变异性对尺度的响应也越快。实际采样过程中, 研究区域越大, 采样深度越深, 所需要的采样点数目越多。

关键词: 土壤有机碳含量; 尺度; 变异性特征

中图分类号: S154.3

土壤有机碳(SOC)在保持土壤肥力、增加粮食产量及缓解温室气体方面均起着重要的作用^[1-2]。SOC 具有空间异质性, 其变异程度依赖于空间尺度^[3-4]。不同尺度下影响因素不同, SOC 空间分布差异较大。因此, 多尺度上研究 SOC 变异性特征及其对空间尺度拓展的响应, 对精确估算土壤碳储量、制定科学有效的样点采集方案以及进行空间尺度转换均具有重要意义。

SOC 变异性特征影响土壤碳库的估算精度, 因此一直是农业和环境科学的研究重点。目前, 对 SOC 变异性的研究多集中在单一尺度, 即某一特定研究区域, 生态学中称为幅度^[5]。根据尺度大小, 从较小的田间尺度^[6-7]和立地尺度, 到中尺度的景观尺度^[8-9]和局域尺度^[10-11], 再到大尺度的区域尺度^[12-13]和大陆尺度^[14-15], 均取得了丰硕的研究成果。如小尺度上, Schoening 等^[16]对德国图林根州 10 000 m² 的山毛榉森林立地 SOC 变异性进行研究, 认为 SOC 储量在林分水平存在很高的小尺度变异; 中尺度上, Yu 等^[17]研究了中国南部红壤区县域内 SOC 空间变异性对采样密度的响应, 结果表明随采样密度增加 SOC 变异

性降低, 不同土地类型和土壤类型 SOC 变异性对采样点密度的响应存在差异; 大尺度上, Guo 等^[14]研究了美国大陆 48 个相邻州的 SOC 含量和变异性, 发现 SOC 的相对空间变异随土壤深度的增加呈明显增加趋势。

近些年多尺度研究也逐渐引起了研究者的关注^[18-24], 一般认为研究区域越大, 影响因素越多, 生态系统越复杂, 变异性也越大。如 Conant 和 Paustian^[19]利用 USDA/NRCS 土壤数据库的 2 700 个全国自然土壤数据, 研究了区域尺度上不同尺度下美国草原 SOC 变异特征, 其变异系数(CV, %)随着尺度的增加而增大, 表现为在县级尺度为 39%, 州级尺度为 54%, 国家尺度为 63%。但也有研究表明土壤特性的空间变异并不总是随着尺度的增大而增大。如李典友等^[23]分析了安徽省六安市不同空间尺度水平表层土壤有机碳的变异性, 研究发现空间变异性表现为县级尺度最大, 而乡镇尺度和市域尺度相对较小。Garten Jr 等^[22]在美国东田纳西州温带阔叶林生态系统, 以某一点为中心, 研究了沿东南西北 4 个方向分别拓展 1、5、10、50、250 和 500 m 时, 表层(15 cm)土壤 11 种土壤性质从小尺度(1 m)到大尺度(1 km)变

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.40921061)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050509)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2010CB950702)资助。

* 通讯作者(xzshi@issas.ac.cn)

作者简介: 王美艳(1983—), 女, 河北廊坊人, 博士研究生, 主要研究方向为遥感与土壤资源管理。E-mail: meiyang528@163.com

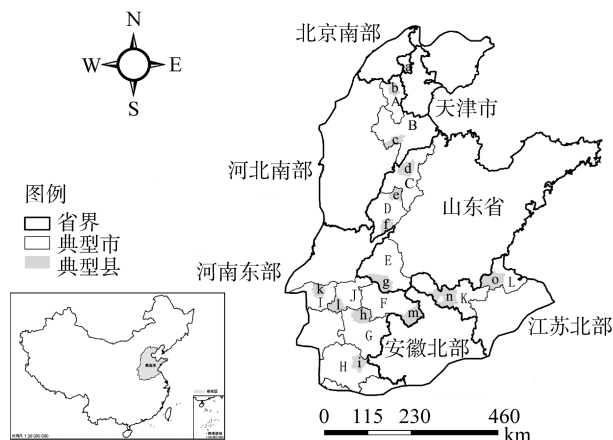
异性,结果表明:在森林生态系统中,土壤性质的空间变异性并不总是随着尺度的增加而增大,其中只有3种性质的变异性随着尺度的增加而增大。也有极少数研究是针对耕作土壤的,如Wang等^[24]基于中国东北地区中国第二次土壤普查的1 041个旱地剖面数据,从行政区尺度(县、地级市、省和大区)、土壤分类尺度(土属、亚类、土类和土纲)和土壤类型(地带性土壤和非地带性土壤)-行政区尺度,研究了该地区旱地土壤表层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)SOC密度的变异性及其对尺度拓展的响应。结果表明:无论是土壤表层还是整个剖面,SOC密度的变异性均随着尺度的增大而增大。可见,不同的区域范围,不同的生态系统,SOC变异性对幅度拓展的响应也不尽相同。

综上所述,SOC变异性的研究多集中在单一尺度,多尺度研究的意义虽然得到了关注,但此方面的研究依然较少,其中以耕地为对象的研究更少;且研究土壤层次较为单一,多为表层或者整个剖面,缺乏对整个剖面不同深度的系统分析。本研究以黄淮海农业区为研究区域,利用全国第二次土壤普查数据,对该区旱地不同土壤深度SOC含量的变异性特征及其对行政区尺度拓展(县级-市级-省级-大区)的响应进行了研究,以期在实际采样和尺度上推等工作提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海农业区以黄淮海平原为主体,土地面积44万km²,包括天津市、山东省、北京市大部、河北省和河南省大部、安徽省和江苏省北部地区^[25](图1)。本区位于温带季风气候区,夏季受东南季风影响,温暖湿润,冬季受西伯利亚冷高压控制,天气寒冷干燥。区内年均温度10℃~17℃,年均降水500~1 000 mm,南高北低,呈梯度分布。第四纪以来东流出海的黄、淮、海河夹带大量泥沙在这里沉积,逐渐形成北、西、西南三面环山,一面敞开的大平原。全区除部分山前台地丘陵外,大部分地区海拔在100 m以下,地势平坦,起伏微缓。该区主要土壤类型包括潮土、砂姜黑土、褐土和棕壤土,土壤质地以砂壤土为主。黄淮海农业区是我国最古老的农业地区之一,总耕地面积为6 720万hm²,占全国耕地的1/5以上,是我国重要的粮棉生产基地,粮食作物以小麦、玉米为主,农业结构单一。



(典型市:A-廊坊市,B-沧州市,C-德州市,D-聊城市,E-菏泽市,F-商丘市,G-周口市,H-驻马店市,I-郑州市,J-开封市,K-徐州市,L-连云港市;典型县:a-香河县,b-永清县,c-泊头市,d-陵县,e-高唐县,f-阳谷县,g-曹县,h-太和县,i-平舆县,k-郑州市区,l-尉氏县,m-永城县,n-铜山县,o-东海县)

图1 研究区及典型地级市、县分布图

Fig.1 Locations of typical cities and counties in study area

1.2 数据源

本研究所用数据来自全国第二次土壤普查,包括6本全国土种志^[26]、5本省土种志、12本市土种志和14本县土种志,共计旱地土壤剖面1 875个。所有土壤剖面数据均包括剖面地理位置、土壤类型、母质类型等信息,并详细记录了土壤发生层的物理性质如土壤质地,土壤化学性质如pH、有机质含量等,土壤养分如全氮、全磷、全钾等。

1.3 土壤剖面分层与SOC含量计算

研究中将整个土壤剖面(0~100 cm)划分为0~20、20~30、30~50、50~70和70~100 cm共5个土壤层次。分别计算各土壤层次土壤有机碳含量SOC(g/kg)。对一个特定的土壤层次,SOC的计算方程如下:

$$SOC_{s-e} = \frac{\sum_{i=1}^n SOM_i \times 0.58 \times BD_i \times H_i}{\sum_{i=1}^n BD_i \times H_i} \quad (1)$$

式中, s 代表土层起始深度, e 代表终止深度; SOC_{s-e} 代表 s - e 土壤深度间隔土壤有机碳含量, n 为包含 s - e 土壤间隔的原土壤发生层数目, BD_i 为 i 层土壤体积质量(g/cm³), SOM_i 为 i 层土壤有机质含量(g/kg), H_i 为特定土壤间隔在 i 层所占的土壤厚度(cm),而0.58为Bemmelen转换系数^[27];如某一土壤剖面为0~18、18~35、35~70和70~105 cm,计算20~50 cm土壤层次的 $SOC_{20-50cm}$ 时,

$$SOC_{20-50cm} = \frac{SOM_{18-35cm} \times 0.58 \times BD_{18-35cm} \times (35-20) + SOM_{35-70cm} \times 0.58 \times BD_{35-70cm} \times (50-35)}{BD_{18-35cm} \times (35-20) + BD_{35-70cm} \times (50-35)}$$

1.4 尺度的设定和统计方法

本研究设置 4 级行政区尺度,从大到小分布为大区级、省级、市级和县级。如图 1 所示,在黄淮海农业区内南北向和东西向共选取典型地级市 12 个和典型县 14 个。考虑到面域的完整性,将北京市和天津市在分析中并入河北省,分别计算各级尺度下土壤有机碳含量及其变异系数。其中,省级、市级和县级尺度 SOC 变异系数均值分别由 5 省、12 市和 14 县的变异系数均值表示。

为了对比不同尺度上 SOC 含量变异性的差异,计算不同尺度间的变异度^[19]。

$$CVratio = \left(\frac{CV_1 - CV_2}{CV_1 + CV_2} \right)^2 \quad (2)$$

式中, CV_1 和 CV_2 分别表示两个不同尺度上 SOC 含量的变异系数。随着变异系数比率增大,不同尺度上 SOC 含量变异程度的差异增加。

2 结果与讨论

2.1 不同行政区尺度 SOC 含量分布及其变异性特征

不同尺度各土壤深度 SOC 含量分布特征如表 1 所示。大区尺度 SOC 含量表层 0 ~ 20 cm 最高,为 5.72 g/kg,随着土壤深度的增加 SOC 含量降低,底层 70 ~ 100 cm 最低,为 3.12 g/kg;相反的,SOC 含量的变异系数却随着土壤深度的增加而增加,由表层的 51.13% 增加到底层的 81.02%。

表 1 不同土壤深度各行政区尺度 SOC 含量(g/kg)及其变异系数(%)
Table 1 Mean values and variance coefficients of SOC contents at different extents and soil depth intervals

尺度		n	0 ~ 20 cm		20 ~ 30 cm		30 ~ 50 cm		50 ~ 70 cm		70 ~ 100 cm	
			平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
省级	大区	1 8755	5.72	51.13	4.32	59.10	3.75	62.99	3.42	79.18	3.12	81.02
	河北	326	6.35	56.06	5.14	64.59	4.77	62.04	4.59	84.46	4.18	90.07
	山东	387	4.86	53.22	3.76	54.80	3.48	53.80	3.28	80.93	3.03	88.69
	江苏	427	6.13	49.84	4.22	62.76	3.48	68.13	3.06	59.38	2.81	63.21
	安徽	129	6.43	35.43	4.64	39.45	3.67	48.09	3.41	50.96	3.07	56.71
市级	河南	606	5.49	47.42	4.23	54.34	3.59	62.66	3.15	79.76	2.84	70.15
	廊坊	97	6.13	67.42	5.22	84.90	4.71	70.83	4.45	72.39	4.19	77.06
	沧州	55	5.33	34.95	4.30	43.28	4.47	58.16	4.21	64.07	3.97	68.09
	德州	45	4.76	31.68	3.98	32.28	3.79	32.07	3.65	31.74	3.69	32.70
	聊城	83	4.41	25.09	3.49	27.30	3.36	26.42	3.19	27.91	2.85	32.25
	菏泽	123	3.87	30.72	3.06	41.63	2.86	40.74	2.65	38.66	2.62	44.73
	商丘	130	4.97	47.08	3.75	51.48	3.19	54.63	2.69	55.76	2.42	57.28
	周口	189	5.69	32.12	4.51	38.06	3.66	46.05	3.10	53.35	2.99	56.98
	驻马店	75	6.83	30.21	5.30	36.79	4.86	41.76	4.39	54.25	3.65	56.31
	连云港	103	6.81	58.72	4.85	76.56	4.13	51.76	3.53	51.64	3.22	56.57
县级	徐州	236	5.80	46.55	3.95	55.21	3.11	63.83	2.72	62.63	2.44	66.96
	开封	58	4.93	39.46	3.33	53.22	2.71	49.81	2.43	49.98	2.36	49.44
	郑州	31	5.72	34.74	4.52	44.12	3.60	58.28	3.15	84.37	2.72	84.05
	香河	19	5.61	38.10	4.36	41.95	4.10	46.70	3.53	51.06	3.17	50.14
	永清	37	5.28	22.56	4.46	33.99	4.13	45.09	4.12	48.84	4.17	54.29
	泊头	16	4.31	30.71	3.55	36.32	3.54	38.73	3.38	49.04	3.54	54.40
	陵县	13	5.49	37.74	4.62	23.12	4.41	19.47	4.12	20.58	4.42	34.03
	高唐	13	3.74	14.03	3.04	22.01	2.97	23.47	2.80	26.44	2.24	39.18
	阳谷	22	4.46	25.82	3.63	30.45	3.45	25.92	3.12	21.00	2.85	21.22
	曹县	31	3.40	39.67	2.52	52.71	2.45	52.74	2.53	45.51	2.57	41.05
	太康	30	4.64	36.40	3.45	46.54	2.91	45.54	2.60	49.10	2.57	50.63
	平舆	30	6.78	23.44	5.43	30.86	4.97	41.91	4.52	61.11	3.69	71.93
	东海	52	6.07	46.87	3.79	58.15	3.54	60.39	2.82	51.54	2.47	50.15
	铜山	59	5.78	38.33	3.92	51.65	2.96	69.82	2.68	65.72	2.43	64.39
	永城	29	4.41	34.14	3.30	41.33	2.83	51.71	2.59	57.21	2.45	54.42
尉氏	23	4.84	49.83	3.42	62.87	2.85	52.20	2.53	55.72	2.46	52.94	
郑州	28	5.89	33.84	4.65	42.99	3.74	57.48	3.26	84.59	2.79	84.82	

省级尺度上,河北省 SOC 含量最高,剖面各层平均为 5.01 g/kg,山东省最低,为 3.68 g/kg;变异系数河北省最高,平均为 71.44%,而安徽省较低,平均值为 46.13%。市级尺度上,SOC 含量最高值在最南部的驻马店市,土壤剖面均值为 5.01 g/kg,最低值则位于中部的菏泽市,为 3.01 g/kg;市级尺度各土壤深度变异系数范围分别为 25.09% ~ 67.42%, 27.30% ~ 84.90%, 26.42% ~ 70.83%, 27.91% ~ 84.37% 和 32.25% ~ 84.05%,其中最北部的廊坊市平均值最高,为 74.52%,山东省的聊城市最低,为 27.80%。县级尺度,南部平舆县 SOC 含量最高,剖面均值为 5.08 g/kg,中部的曹县最低,为 2.69 g/kg;各土壤深度变异系数范围分别为 14.03% ~ 49.83%, 22.01% ~ 62.87%, 19.47% ~ 69.82%, 20.58% ~ 84.59% 和 21.22% ~ 84.82%,其中山东省的高唐县和阳谷县变异系数最低,平均值分别为 25.03% 和 24.83%。从整体分布来看,中部典型市、县土壤有机碳含量较低,南部和北部相对较高,而变异系数在 SOC 含量较高的地方也相对较高,且一般随着土壤深度加深而增大。

2.2 不同土壤深度 SOC 含量变异性特征对行政区尺度拓展的响应

计算 5 省、12 市和 14 县 SOC 含量变异系数均值,分别代表省级、市级和县级尺度 SOC 含量变异特征,如图 2 所示。各行政区尺度 SOC 含量变异系数均随着土壤深度的增加而增大,分别由 0 ~ 20 cm 表层的 33.68%(县级)、39.90%(市级)、48.40%(省级)和 51.13%(大区)增大到 70 ~ 100 cm 底层的 51.68%(县级)、56.87%(市级)、73.77%(省级)和 81.02%(大区);而在土壤各深度层次, SOC 含量的变异系数均随着行政区尺度的增大而增大,分别由县级尺度的 33.68%(0 ~ 20 cm)、41.07%(20 ~ 30 cm)、

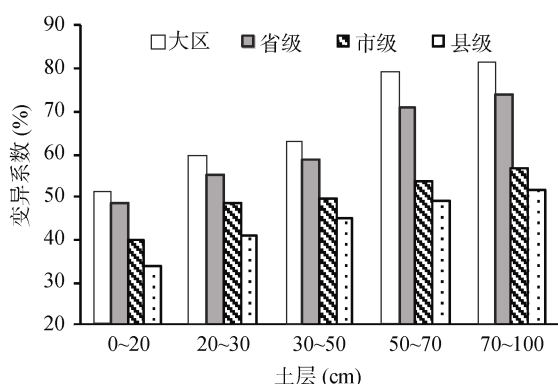


图 2 各土壤深度 SOC 变异性对尺度拓展的响应
Fig. 2 Responses of SOC variability to expansion of scale at different soil depth intervals

45.08%(30 ~ 50 cm)、49.10%(50 ~ 70 cm)和 51.68%(70 ~ 100 cm)增大到 51.13%(0 ~ 20 cm)、59.10%(20 ~ 30 cm)、62.99%(30 ~ 50 cm)、79.18%(50 ~ 70 cm)和 81.02%(70 ~ 100 cm)。

为了定量化表达各尺度间变异性的差异,计算了各尺度间的变异度(公式 2),变异度越大说明两尺度间变异性的差异越大。如图 3 所示,两个尺度间的跨度越大,其变异度也就越大。当行政区尺度间跨越 1 个尺度时,大区-省级和市级-县级变异度在各土壤深度均较小,而省级-市级变异度则相对较大,尤其是 50 ~ 70 cm 高达 0.019;当行政区尺度间跨越 2 个尺度时,省级-县级间和大区-市级在表下层变异度相当,而表层省级-县级变异度明显高于大区-市级,最高相差 0.017(0 ~ 20 cm)。随着尺度等级的增加尺度间变异度呈明显的阶梯状,表现为 3 个尺度等级 > 2 个尺度等级 > 1 个尺度等级。

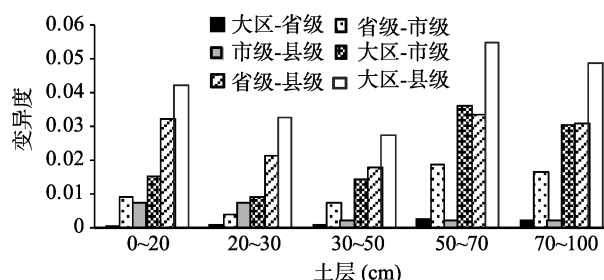


图 3 不同土壤深度两尺度间的变异度
Fig. 3 CV ratios between two scales at different soil depth intervals

SOC 变异性随着尺度的增加呈明显的增大趋势,尺度间跨度越大, SOC 变异度也越大。这与 Wang 等^[24]在东北地区的研究结论相同。但比较两地区 SOC 变异性特征及其对尺度的响应还是存在差异的,表 2 所列为两研究区旱地 0 ~ 20 cm 土层不同尺度 SOC 变异系数统计特征。由此表我们可以看到,黄淮海农业区各尺度 SOC 变异系数最大值、最小值和均值均低于东北地区;且黄淮海农业区对尺度的响应较东北地区弱,尺度由县级到大区级黄淮海变异系数增加了 16.99%,而东北地区则增加了 42.15%。这是因为气候因子对中国东北和华北地区 SOC 具有显著影响^[28],东北区年均温 -4℃ ~ 11℃,年均降水 350 ~ 1100 mm,气候跨度远大于黄淮海区的 10 ~ 17℃ 和 500 ~ 1000 mm,因此,黄淮海地区相较于东北地区对尺度拓展的响应程度相对较弱。

2.3 SOC 含量变异性对面积拓展的响应

分别用 14 个典型县、12 个典型市和 5 个省的行政区面积均值代表县级、地市级和省级尺度大小,尺度面积取自然对数做自变量,各尺度平均变异系数为

表 2 不同行政区尺度 0~20 cm 土层 SOC 变异性特征(%)比较
Table 2 CVs of SOC at 0~20 cm soil depth in two regions

尺度	黄淮海农业区				东北地区 ^[24]			
	行政区个数	最小值	最大值	均值	行政区个数	最小值	最大值	均值
大区	1	-	-	51.01	1	-	-	89.37
省级	5	35.43	56.06	47.54	4	52.53	106.04	71.89
市级	12	25.09	67.42	36.55	8	36.08	143.72	57.70
县级	14	14.03	49.83	34.02	9	32.85	115.54	47.22

因变量，建立各土壤深度行政区面积的自然对数与 SOC 含量变异系数的关系，如图 4 所示。各土壤深度，SOC 含量变异系数与行政区面积均值的自然对数呈线性相关，即与行政区面积呈对数相关关系。由各土壤深度拟合公式可以看出随着土壤深度的增加，斜率增大，说明 SOC 变异性对尺度的响应随着土壤深度的增大而变快；表层的变异性始终是低于表下层的，因此在尺度拓展中，对土壤表层的尺度上推要比表下各层的确定性更高；而实际采样过程中，研究区面积越大，采样深度越深，为降低变异性，所需的采样点也就越多。

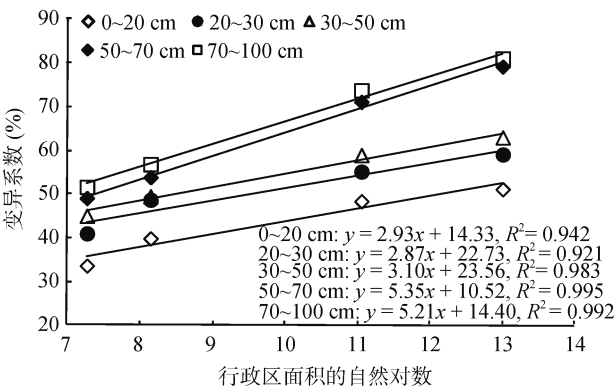


图 4 SOC 含量变异性与研究区大小的关系
Fig. 4 Relationships between SOC variability and study area

面积的大小在一定程度上反映了该区域环境下影响因子的复杂性，通过建立面积与 SOC 变异性的关系，可以为尺度上推和采样点布设等工作提供理论基础。面积与 SOC 变异性之间的对数关系在 Conen 等^[29]和 Wang 等^[24]的研究中均有描述，两个研究中面积减少 6 个数量级均能使 SOC 含量的变异减少一半。而本研究区中，减少同样的面积，仅能使各土壤深度分别减少 31.86%、27.55%、28.15%、39.42% 和 37.21%，而要使变异也减少一半，面积则需减少 8~11 个数量级。这大概是由于黄淮海农业区自然环境比较均一，SOC 的变异系数本身较低，对尺度的变化响应也比较缓慢的原因。

3 结论

黄淮海农业区旱地 SOC 含量较低，土壤肥力低

于全国平均水平。SOC 含量变异系数整体较低，随着土壤深度的增加而增大；在不同土壤深度，变异性对尺度的拓展均表现出增加的趋势；而两尺度间的变异性随着尺度间跨度的增加而增加，表现为 3 个尺度等级>2 个尺度等级>1 个尺度等级；SOC 变异系数均值与研究区面积呈对数关系，表下层随着土壤深度的增加，SOC 变异性对尺度的响应也越快。因此实际采样过程中，研究区面积越大，采样深度越深，为降低变异性，所需的采样点也就需要越多。

参考文献：

[1] Janzen HH. Carbon cycling in earth system—A soil science perspective[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 104: 399–417

[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1 623–1 627

[3] Walter C, Rossel RAV, McBratney AB. Spatio-temporal simulation of the field-scale evolution of organic carbon over the landscape[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1 477–1 486

[4] Wang YQ, Zhang XC, Zhang JL, Li SJ. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 486–495

[5] Turner MG, Dale VH, Gardner RH. Predicting across scales: Theory development and testing[J]. Landscape Ecology, 1989, 3: 245–252

[6] Bricklemeyer RS, Miller PR, Paustian K, Keck T, Nielsen GA, Antle JM. Soil organic carbon variability and sampling optimization in Montana dryland wheat fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60(1): 42–51

[7] Feng S, Tan S, Zhang A, Zhang Q, Pan G, Qu F, Smith P, Li L, Zhang X. Effect of household land management on cropland topsoil organic carbon storage at plot scale in a red earth soil area of South China[J]. Journal of Agricultural Science, 2011, 149: 557–566

[8] VanDam D, Veldkamp E, VanBreemen N. Soil organic carbon dynamics: Variability with depth in forested and deforested soils under pasture in Costa Rica[J]. Biogeochemistry, 1997, 39(3): 343–375

[9] Wang ZM, Ren CY, Song KS, Zhang B, Liu DW, Yang GA, Liu ZM. Spatial variation of soil organic carbon and

- its relationship with environmental factors in the farming-pastoral ecotone of Northeast China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, 20(1A): 253–261
- [10] Fu BJ, Wang YF, Lu YH, Song CJ, Luan Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 70–76
- [11] Han FP, Hu W, Zheng JY, Du F, Zhang XC. Spatial variability of soil organic carbon in a catchment of the Loess Plateau[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2010, 60(2): 136–143
- [12] Gruneberg E, Schoning I, Kalko EKV, Weisser WW. Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons[J]. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 426–433
- [13] Takata Y. Analysis of spatial and temporal variation of soil organic carbon budget in northern Kazakhstan[J]. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 2010, 44(4): 335–342
- [14] Guo YY, Amundson R, Gong P, Yu Q. Quantity and spatial variability of soil carbon in the conterminous United States[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 590–600
- [15] Xie XL, Sun B, Zhou HZ, Li AB. Soil organic carbon storage in China[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 491–500
- [16] Schoening I, Totsche KU, Kogel-Knabner I. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 631–642
- [17] Yu DS, Zhang ZQ, Yang H, Shi XZ, Tan MZ, Sun WX, Wang HJ. Effect of soil sampling density on detected spatial variability of soil organic carbon in a red soil region of China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 207–213
- [18] Wagenet RJ. Scale issues in agroecological research chains[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 50: 23–34
- [19] Conant RT, Paustian K. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: Implications for detecting change at different scales[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: S127–S135
- [20] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 候振安, 冶军, 鲍柏杨. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J]. *土壤*, 2004, 36(4): 376–381
- [21] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 傅伯杰, 王静. 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
- [22] Garten Jr CT, Kang S, Brice DJ, Schadt CW, Zhou JZ. Variability in soil properties at different spatial scales (1m–1km) in a deciduous forest ecosystem[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 2 621–2 671
- [23] 李典友, 潘根兴, 陈良松, 李军. 安徽六安市表层土壤有机碳的空间分布及尺度变异分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(4): 37–41
- [24] Wang DD, Shi XZ, Lu XX, Wang HJ, Yu DS, Sun WX, Zhao YC. Response of soil organic carbon spatial variability to the expansion of scale in the uplands of Northeast China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 302–310
- [25] 周立三. 中国农业地理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 337–346
- [26] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 I–VI[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [27] 文启孝. 土壤有机质研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1984
- [28] Dai WH, Huang Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China[J]. *Catena*, 2006, 65(1): 87–94
- [29] Conen F, Zerva A, Arrouays D, Jolivet C, Jarvis PG, Grace J, Mencuccini M. The carbon balance of forest soils: Detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and boreal forests[A]// Griffith H, Jarvis Pg. *The Carbon Balance of Forest Biomes*[M]. London: Garland Science/ BIOS Scientific Publishers, 2004: 233–247

Scale Effects of Soil Organic Carbon Variability of Uplands in Huang-Huai-Hai Agriculture Region of China

WANG Mei-yan^{1,2}, SHI Xue-zheng^{1*}, YU Dong-sheng¹, XU Sheng-xiang¹,
TAN Man-zhi¹, ZHAO Yong-cun¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: Spatial variability of soil organic carbon (SOC) is scale dependent. Estimating spatial variability of SOC at different scales is of great significance for accurately predicting the SOC pool. Four administrative scales were made in this study, namely region, province, city and county. Variability of SOC content and its response to expansion of scale in different soil depth intervals (0 – 20, 20 – 30, 30 – 50, 50 – 70 and 70 – 100 cm) in the upland of the Huang-Huai-Hai agriculture region were examined based on coefficient of variation (CV) values using 1 875 profiles data obtained from the 2nd national soil survey of China. The results showed that the mean variability coefficient of SOC density increased with the expansion of scale and the increase of soil depth. The mean CV of SOC ranged from 33.68% at the county extent and 0 – 20 cm soil depth interval to 81.02% at the region extent and 70 – 100 cm soil depth. The CV ratio increased gradient with the rank between two scales increasing, that is three scale rank (region-county) > two scale rank (province-county and region-city) > one scale rank (province-city, city-county and region-province). The mean CV of SOC had a significant logarithmic relationship with administrative area, namely $y = a + b \times \ln(x)$. The response of SOC variability to expansion of scale became quickly when soil depth increased. More soil sampling points are need if the study area is larger or sampling depth is deeper.

Key words: Soil organic carbon content, Scale, Variability