

徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及 主控因素分析*

赵明松^{1,2} 张甘霖^{1†} 王德彩^{1,3} 李德成¹ 潘贤章¹ 赵玉国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 中国科学院研究生院,北京 100049)

(3 河南农业大学林学院,郑州 450002)

摘要 土壤有机质含量是估算土壤碳储量、评价土壤肥力和质量的重要指标,精确估算土壤有机质含量具有重要意义。本研究在徐淮黄泛冲积平原西北部选取了一个 24 km × 24 km 方形区域为研究区,按照套合采样方法,采集了 168 个耕作层土样,测定分析土壤有机质含量和机械组成,运用地统计学方法和 GIS 技术研究了徐淮黄泛平原区表层土壤有机质含量的空间变异特征,利用方差分析和回归分析定量分析了区域内什么因素对土壤有机质空间变异的影响。统计结果表明,研究区土壤有机质含量为 $21.80 \pm 7.43 \text{ g kg}^{-1}$,属中等水平,变异系数为 34.08%,属中等变异强度;地统计分析表明,研究区具有强烈的空间自相关性,结构变异占主导作用,各向异性显著,在 45° 方向上变异程度最剧烈,土壤有机质呈条带状分布,自东北向西南呈递减趋势;方差分析和逐步回归分析表明,土壤机械组成是研究区土壤有机质空间变异的主控因素,能够独立解释空间变异的 64.9%,其次是土地利用、成土母质、土壤类型,四个因子对土壤有机质空间变异的综合解释为 74.6%。

关键词 土壤有机质;空间变异;影响因素;地统计学;逐步回归

中图分类号 S159

文献标识码 A

土壤是具有高度变异性的时空连续体。土壤的空间变异是指在一定的景观内,在同一时间、不同地点的土壤性质存在明显的差异性和多样性。研究土壤空间变异及空间分布特征对土壤预测制图、精准农业和长期定位监测等具有重要意义,是研究高效采样策略所必需考虑的因素^[1]。土壤有机质(Soil organic matter, SOM)是土壤的重要组成部分,对改善土壤物理、化学性质以及植被的生长起着重要作用,在环境保护、农业可持续发展等方面有着重要的意义^[2]。SOM 是全球碳循环过程中重要的碳库,直接影响全球气候变化^[3],SOM 也是地表过程模拟中必须的因素之一。

20 世纪 70 年代起,国内外众多学者多采用地统计学方法(主要是克里格插值法)对 SOM 的时空变异进行了研究^[4-6],如 Cambardella 等^[6]研究了田间尺度 SOM、全氮等属性的空间变异,利用块金系数确定变异强弱标准,Kuzel 等^[7]研究了 1 hm² 区域

内镉浓度、pH 和 SOM 的空间变异,Mishra 等^[8]在田间尺度上研究了红壤地区 SOM 和 pH 的空间变异。国内研究主要集中在表层 SOM 的空间变异,研究区域涉及红壤丘陵区、黄土高原、半干旱荒漠区、典型岩溶流域、四川盆地^[9-13],主要揭示了气候、土壤类型、地形、地貌、土地利用等因素对其空间变异的影响。SOM 空间变异的研究为精确估算区域碳储量、评价土壤肥力及其不确定性提供科学依据。

徐淮黄泛平原位于江苏省西北部,境内淮河和苏北灌溉渠以北的广大平原(图 1 左),属于黄淮海平原的一部分,行政区包括徐州、淮阴两市大部共 16 个县^[14]。徐淮黄泛平原由黄河 1128 年夺泗、夺淮后决口泛滥和冲积作用形成,地势相对较高,东西跨度最大,由西部(丰县、沛县)的 40 多 m 逐渐降低到淮阴市约 10 m 左右。该区域地处暖温带,水热条件充裕,土壤分布规律为“高沙低黏”,主要土壤类型为潮土,是江苏省主要的小麦、玉米生产基地

* 江苏省基础研究计划项目(No. BK2008058)、科技部国际科技合作项目(No. 2010DFB24140)资助

† 通讯作者, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介:赵明松(1983—),男,安徽淮南人,博士研究生,主要从事土壤空间变异和数字土壤制图研究。E-mail: zhaomingsong@163.com

收稿日期:2011-11-22;收到修改稿日期:2011-12-26

之一^[15]。徐淮黄泛平原土壤有机质含量较低,在很大程度上影响着作物产量,制约着农业发展。虽然已有徐淮黄泛平原 SOM 空间变异特征和影响因素的相关研究报道,如杨艳丽等利用第二次土壤普查数据库以土壤图斑为单元,研究了江苏北部土壤属性(有机碳、黏粒、CEC 和 pH)的空间分异以及与成土母质和土壤类型的关系^[16],但如同其他类似的研究一样,由于相关资料的不足,研究更偏重于描述土壤上述属性的空间变异,但在土壤属性之间的相互作用、人为因素(土地利用等)对土壤属性空间变异的影响方面涉及甚少,且在变异的机理解释上多以定性为主。

本研究借助地统计学、方差分析和回归分析,探讨徐淮黄泛平原 SOM 空间变异规律,并注重定量分析土壤机械组成、土地利用、成土母质和土壤类型对其空间变异的影响,为采取具有针对性的措施进一步提升徐淮黄泛平原区域土壤固碳能力、土壤肥力和质量等提供科学依据。

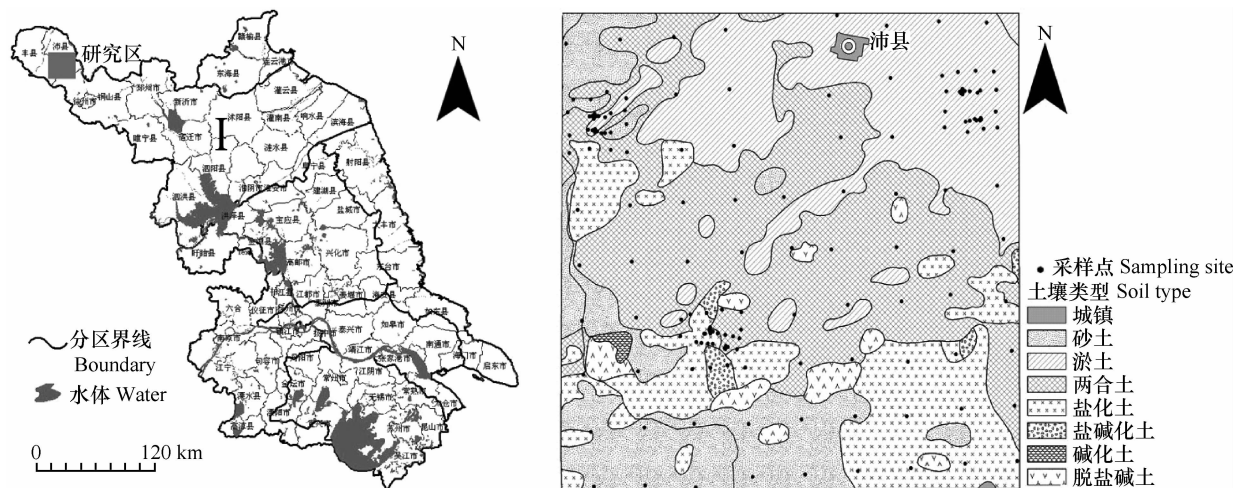


图1 研究区位置(左)、土壤类型和样点分布图(右)(左图中 I 为徐淮黄泛平原)

Fig. 1 Location (left), soil type and sampling sites (right) of the study area (I in the left figure stands for the Xu-Huai alluvial plain)

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集

样品采集时间是 2009 年 11 月农作物完全收割后。按照不同采样密度并兼顾土壤类型,采用套合采样方法共布设样点(典型田块)168 个,采样深度为耕作层(0~20 cm),样点分布见图 1 右。每个样品是由田块中心及其周围半径 10~20 m 内按“S”形取 8~12 个耕作层土样均匀混合后四分法留 1 kg,并在田块中心以 GPS 定位。

采样包含 3 种采样尺度:(1)大尺度,整个研究区采用 3 km × 3 km 正交网格采样(采集样品 78 个);(2)中尺度,在大尺度采样单元内,选择土壤类

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于徐淮黄泛平原北部,地理坐标为 116°45'32"~117°2'14"E,34°31'12"~34°45'6"N,主要包括沛县南部和丰县东南部,约为 24 km × 24 km 的方形区域,面积为 580 km²(图 1 右)。研究区地形平坦,地势西南高、东北低,平均海拔 30~49 m(图 2);属温暖带半湿润季风气候,年均气温 14.2℃,年均降水量 816.4 mm,年均日照 2 308 h,年均无霜期约 201 d。研究区内成土母质主要为含碳酸盐的河流冲积物和泻湖相沉积物,主要土壤类型为石灰淡色潮湿锥形土(黄潮土)、弱盐淡色潮湿锥形土(盐化黄潮土、盐碱化黄潮土、碱化黄潮土)^[17]。土地利用方式以旱地和水田为主,分别占总面积的 48.94% 和 30.90%(图 3),轮作制度主要为稻(或玉米、棉花)-麦。

型丰富的区域加密采样,采样间隔为 1 km(采集样品 48 个,其中 12 个为大尺度样品);(3)小尺度,在中等尺度采样单元内,按 500、100、50 m 间隔加密采样(采集样品 68 个,其中 14 个为中等尺度样品)。

1.2.2 样品处理与分析

样品在实验室自然风干后,用木棒压碎挑出砾石、草根等杂物,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 尼龙筛。土壤有机质含量采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化-滴定法测定^[18],土壤机械组成用 LS230 激光粒度分析仪(美国 Beckman Coulter Co. 公司产,测试粒径范围 0.04~2 000 μm)测定,并进行国际制分级:砂粒(2~0.02 mm),粉粒(0.02~

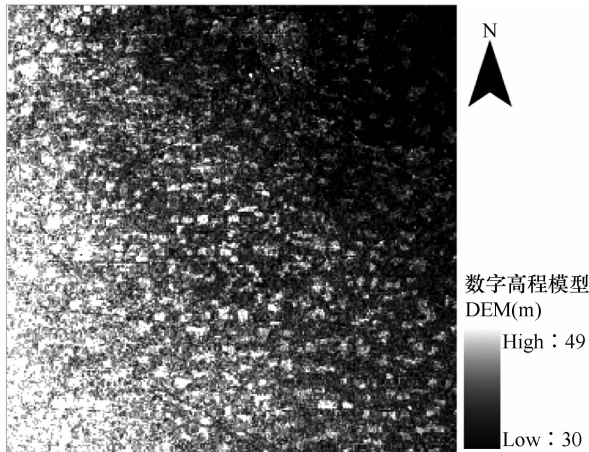


图2 研究区数字高程模型(DEM数据来源于NASA提供的SRTM(Shuttle Raster Topography Mission), <https://wist.echo.nasa.gov/api>。由西南向东北,海拔逐渐降低)

Fig. 2 Digital elevation model of the study area (DEM data sourced from SRTM (Shuttle Raster Topography Mission) provided by NASA, <https://wist.echo.nasa.gov/api>, declining gradually from southwest to northeast in altitude)

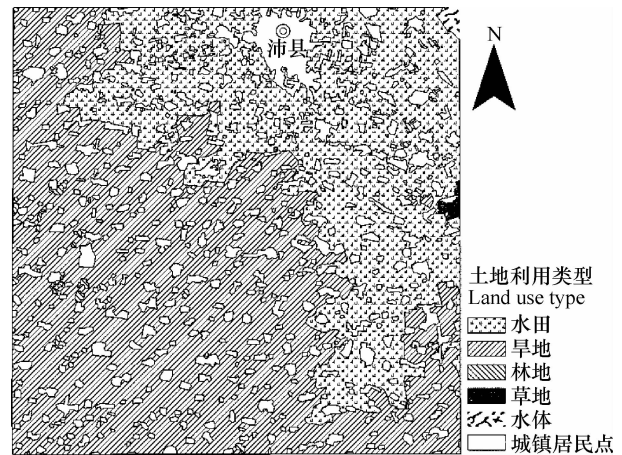


图3 研究区土地利用图(根据Landsat5 TM遥感影像解译,影像来源于<https://wist.echo.nasa.gov/api>,轨道号为122/36,获取时间为2009年8月30日)

Fig. 3 Land use map of the study area (Landuse data were derived from Landsat5 TM image obtained on August 30, 2009, which was provided by NASA <https://wist.echo.nasa.gov/api>, and orbit number is 122/36)

0.002 mm),黏粒(<0.002 mm)。

1.2.3 数据处理 数据分析采用经典统计学、地统计学方法、方差分析和逐步回归分析。采用统计软件SPSS 13.0 for Windows对土壤有机质含量进行描述性统计、Kolmogorov-Smirnov检验以及相关分析。采用GS+7.0(Gamma Design Software, Plainwell, MI USA)软件进行地统计学分析。变异函数是地统计学的基本工具,用于计算变异函数的公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $N(h)$ 为距离等于 h 时的点对数; $Z(x_i)$ 为在位置 x_i 处的数值; $Z(x_i + h)$ 为在距离 $x_i + h$ 处的数值。

在ARCGIS 9.2软件中,利用Geostatistics模块Kriging插值绘制有机质空间分布图和预测误差图,分析空间变异特征。通过方差分析和逐步回归分析研究土地利用、成土母质、土壤类型对SOM空间变异的影响程度及主控因素。

土地利用、成土母质和土壤类型为多分类变

量,进行回归分析时采用哑变量(Dummy variable)为其赋值,假设分类变量 Y 有 $m+1$ 个水平,为保证设计矩阵满秩,转化为 m 个哑变量 Y_1, Y_2, \dots, Y_m ,哑变量具体赋值方法见文献[19]。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机质含量的描述性统计特征

表1为研究区SOM含量描述统计特征值。研究区SOM含量介于 $7.2 \sim 38.45 \text{ g kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 21.80 g kg^{-1} ,属中等水平^[20]。中位数为 20.75 g kg^{-1} ,低于且接近平均值,说明了集中趋势度量的主导作用。变异系数(Coefficient variation, CV)反映了特性参数的变异程度,揭示区域化变量的离散程度。研究区SOM含量的CV为34.08%、标准差为 7.43 g kg^{-1} ,属于中等变异强度^[21]。K-S检验表明研究区SOM符合正态分布($p > 0.05$),满足地统计学分析的要求。

表1 研究区土壤有机质含量的统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of soil organic matter

土壤属性	样点数	范围	中位数	均值	标准差	偏度	峰度	变异系数	K-S
Soil property	Sample size	Range	Median	Mean	SD	Skewness	Kurtosis	CV (%)	检验
土壤有机质 SOM (g kg^{-1})	168	7.42 ~ 38.45	20.75	21.80	7.43	0.214 0	-0.840 0	34.08	0.100

2.2 土壤有机质含量空间变异结构特征分析

运用 GS + 软件对研究区土壤有机质含量进行变异函数拟合(表 2,图 4)。根据决定系数(R^2)、残差(Residual)等,选择变异函数的拟合模型^[22]。由图中可以看出,研究区 SOM 变异函数比较符合高斯模型。

空间变异主要包括随机性和结构性两部分变异。表 2 中, C_0 为块金值,表示块金效应,反映了区域化变量内部随机性的可能程度,存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应^[23]; C 为结构方差,又称偏基台值,表示由土壤、母质、地形、气候等非人为区域因素引起的结构变异; $C_0 + C$ 为基台值,表示系统内总的变异。块金值/基台值($C_0/(C_0 + C)$)又称块金系数,表示空间异质性程度,比值高,说明有随机部分引起的空间变异程度较大^[24];相反,则由空间自相关部分引

起的空间变异程度较大。一般认为,小于 25% 变量具有强烈的空间自相关性;在 25%~75% 变量具有中等的空间自相关性;大于 75% 变量空间自相关性很弱^[6],变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行预测^[25];若块金系数接近于 1,说明在整个尺度上具有恒定的变异。由表 2 知研究区的块金值为 10.1,说明在当前的采样尺度范围内存在着由采样误差、短距离的变异、随机因素引起的变异。块金系数为 14.1%,区域内存在强烈的空间自相关性,说明结构性因素对研究区 SOM 空间变异起主导作用,随机性变异带来的影响较小。变程表示具有相似性质的斑块的空间连续性的范围,变程以内的空间变量具有空间自相关性,变程以外则不存在空间自相关。变程约为 25 218 m,说明研究区 SOM 在此空间范围内分布连续,存在空间自相关性,超出此范围空间自相关性消失。

表 2 土壤有机质含量的半方差函数理论模型和参数

Table 2 Semivariance model and its parameters for soil organic matter content

土壤属性	理论模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程	决定系数	残差
Soil property	Theoretical model	Nugget (C_0)	Sill ($C_0 + C$)	Nugget/Sill (%)	Range (m)	R^2	Residual
土壤有机质	高斯模型	10.1	71.2	14.1	25 218	0.980	0.285
SOM (g kg^{-1})	Gaussian model						

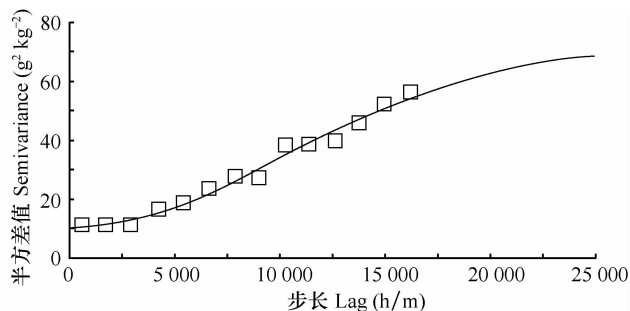


图 4 土壤有机质各向同性半方差函数图

Fig. 4 Isotropic semivariogram of soil organic matter

为了更加深入了解研究区内 SOM 的空间变异特征,用 GS + 7.0 软件绘出了 0°、45°、90°、135° 方向上的半方差函数图(图 5),进一步分析空间变异的各向异性。从图 5 中可以看出,SOM 在东西 0° 方向和南北 90° 方向上的变异程度明显小于东北—西南 45° 方向和东南—西北 135° 方向上的变异程度,说明 45°、135° 方向的变异较 0°、90° 方向复杂。这主要是由于研究区地势西高东低(图 2),西部的大沙河沉积物按从西南向东北“紧沙慢淤”由粗到细有规律的变化引起的,东部毗邻微山

湖,湖相沉积物质地黏重,整个研究区域沉积物质地自西南向东北依次为砂质、壤质、黏质^[17]。在 0° 和 90° 方向上,当步长小于 10 000 m 时有机质随步长的变异程度大致相似,表现为各向同性,但当步长大于 10 000 m 时,在 90° 方向半方差值呈降低趋势;而当步长大于约 7 500 m 时,在 45° 方向上有机质的变异程度有明显的上升趋势,在 135° 方向上,其变异程度复杂,有多处半方差值出现高低交替,差别较大。

2.3 土壤有机质含量克里格插值制图及分析

采用克里格插值后,选用交叉验证(cross-validation)参数评价插值精度^[26]:标准平均值(MS)接近 0,预测结果好;均方根预测误差(RMS)最小,平均标准误差(ASE)接近 RMS,预测结果好;标准均方根预测误差(RMSSE)接近 1,预测结果好。表 3 中为几种克里格插值方法的交叉验证参数,从中看出普通克里格对有机质的插值 MS 最接近于 0, RMSSE 也最接近于 1, RMS 虽然较大,但 ASE 最接近于 RMS,因此,采用普通克里格对 SOM 进行插值绘制,绘制了 SOM 含量空间分布和标准误差预测图(图 6)。

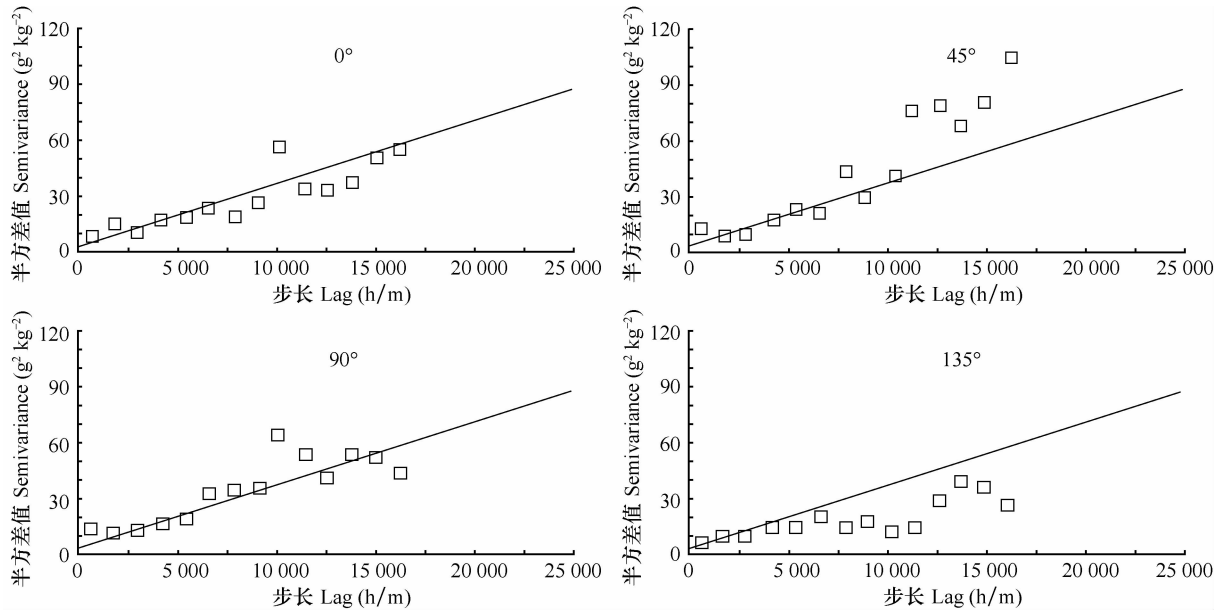


图 5 土壤有机质各向异性半方差函数图

Fig. 5 Anisotropic semivariogram of soil organic matter

表 3 克里格插值交叉验证参数

Table 3 Cross-validation parameters of Kriging

	标准平均值 MS	均方根预测误差 RMS	平均标准误差 ASE	标准均方根预测误差 RMSSE
普通克里格 Ordinary Kriging	0.003 3	3.573	3.492	1.013
简单克里格 Simple Kriging	0.006 8	3.449	3.074	1.213
泛克里格 Universal Kriging	0.008 2	3.455	3.077	1.214

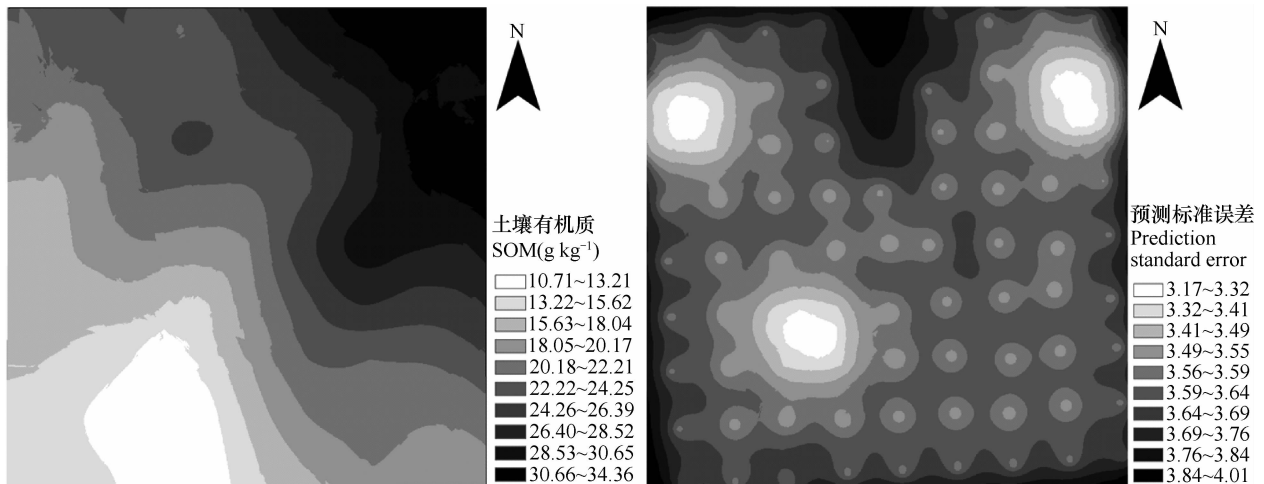


图 6 普通克里格插值的土壤有机质空间分布图(左)和标准误差图(右)

Fig. 6 Spatial distribution of SOM (left) and its prediction standard error (right) based on Kriging

由图 6 左看出,研究区 SOM 含量插值结果的范围在 10.71 ~ 34.36 g kg⁻¹,均值为 21.76 g kg⁻¹,标准差为 5.51 g kg⁻¹,均较 SOM 实测值的相应统计值小(表 1),预测值的 CV 为 25.32%,较实测值

34.08% 小,表明空间数据的变异程度减弱。这主要是由于 Kriging 插值方法是无偏最优估计,追求估值的精度,往往会对真实数据进行平滑作用^[1,25-26],在插值过程中减小了样本集的波动性,但仍会保留数

据的整体趋势性,有助于掌握总体空间分布状况。

研究区 SOM 含量空间分布总体特征明显:SOM 含量呈带状分布,由东北向西南方向逐渐降低,在该方向上 SOM 含量变异强烈,这与上文分析的 SOM 在不同方向上的变异程度差异相互印证;区域内 SOM 含量最高值分布在东北部,含量达 30 g kg^{-1} 以上,最低处在区域西南端,含量低于 13 g kg^{-1} 。这主要与区域内成土母质差异引起的,从西南至东北沉积物质地依次为砂质、壤质、黏质,在质地黏重的东北部,黏粒与有机物质形成有机-无机复合体,吸附稳定 SOM,降低了矿化速度,有利于有机质的积累,而在质地较粗的西南部黏粒含量低,缺少这种保护机制。

由图 6 右插值预测标准差图可以看出,预测误差随距采样点距离增加而增加,即采样点周围插值误差较小。而在 3 个加密样区预测误差低,采用不同尺度套合的采样方案,有利于研究区域内不同级别的空间变异,可以提高预测精度。同时,空间估值的精度存在边际效应,即误差的高值区域集中在样区的边界,样区边界精度衰减较内部更为迅速。其原因在于边界区域参与空间插值的样点个数减少,导致边界区域的估值精度较低。

2.4 土壤有机质空间变异影响因素及主控因素分析

前文已经初步揭示出结构性因素(由土壤母质、地形、气候等非人为区域因素)对研究区 SOM 空间变异起主导作用。由于研究区地形平坦,气候条

件相似,故本文主要探讨空间分布差异较为明显的土壤机械组成、成土母质、土壤类型以及土地利用四个因素对 SOM 含量空间变异的影响。

2.4.1 土壤机械组成对土壤有机质空间变异的影响 土壤理化特性在局部范围内影响 SOM 含量^[2],其中研究较多的是土壤质地。土壤机械组成影响着土壤的耕性、通透性、保水保肥性能^[27-28],特别是砂粒和黏粒含量,可以显著影响 SOM 的累积和矿物组成^[29]。

表 4 为研究区土壤机械组成与 SOM 的相关系数矩阵。土壤砂粒含量与土壤有机质呈极显著负相关($p < 0.01$),相关系数为 -0.81 ;与粉粒和黏粒含量呈显著正相关($p < 0.01$),相关系数分别为 0.81 和 0.71 。这主要是因为土壤中黏粒含量较高会增加物理和化学保护机制,即黏粒通过与有机物质结合形成有机-无机复合体,吸附稳定 SOM,降低了 SOM 的矿化速度,有利于有机质的积累;相反砂粒含量较高的土壤中,则减少或缺少这种保护机制,有机质矿化分解速率加快,导致有机质含量低^[30-31];而 SOM 含量随粉粒含量增加,主要反映在粉粒对土壤水分有效性、植被生长的正效应及其对土壤有机质的保护作用^[32-34]。此外,土壤中由于黏粒含量的差异,对土壤水、气、热等物理性状均有重要影响,从而导致土壤微生物的种群及其活性,有机质的积累和消耗也受到一定的制约。土壤质地是造成该区域土壤有机质变异的主要原因。

表 4 土壤有机质含量与土壤机械组成间相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix between soil organic matter and soil mechanical composition

土壤属性 Soil property	土壤有机质 SOM	砂粒含量 Sand	粉粒含量 Silt	黏粒含量 Clay
土壤有机质 SOM	1			
砂粒含量 Sand	-0.81^{**}	1		
粉粒含量 Silt	0.81^{**}	-0.98^{**}	1	
黏粒含量 Clay	0.71^{**}	-0.92^{**}	0.82^{**}	1

注: ** 在 0.01 水平上相关性显著($n = 168$) Note: ** Significant at $p = 0.01$ ($n = 168$)

利用 ARCGIS 9.2 对研究区土壤黏粒、砂粒含量进行普通 Kriging 插值(图 7)。黏粒含量空间分布趋势与有机质分布(图 6 左)相一致,反映了两者的正相关。黏粒含量高的地区土壤中的细颗粒对有机质有吸附保护作用,有机质不易被矿化分解。砂粒含量空间分布于有机质分布趋势相反,二者呈显著负相关。

2.4.2 成土母质与土壤类型对土壤有机质空间变异的影响 成土母质是土壤形成的基础,它通过

影响土壤的矿物组成和土壤质地,进而影响土壤理化性质。对各母质类型、土种的 SOM 含量和机械组成进行统计分析,结果见表 5。从统计结果看出,不同成土母质和不同土种的 SOM 含量平均水平差异较大。成土母质中,泻湖相沉积物的 SOM 含量最高,达到 31.16 g kg^{-1} ,河流冲积物的最低,为 18.68 g kg^{-1} ;两种成土母质的粉粒含量相当,其黏粒和砂粒含量差异明显,泻湖相沉积物中黏粒含量约为河流冲积物的 2 倍。不同土壤类型中,淤土(石灰淡

色潮湿锥形土)的 SOM 含量最高,为 28.15 g kg^{-1} ,黏粒含量也最高(22.00%);盐碱化土(弱盐淡色潮湿锥形土)最低,SOM 和黏粒均不足前者的 1/2。表明在黏粒含量高的土壤中有有机质易于累积含量较高,各土种有机质含量均属中等变异水平,两合土(石灰淡色潮湿锥形土)变异较强烈。杨艳丽等^[16]研究表明在江苏北部成土母质影响土壤酸碱性。

土壤 pH 通过影响微生物的活性而影响有机质的降解,各种微生物都具有其最适宜的活动的 pH 范围,当 pH 过低 (< 5.5) 或过高 (> 8.5) 对一般的微生物都不大适宜,会影响土壤有机质的分解和累积^[2]。研究区土壤为弱碱性且变化较小,pH 为 8.1 ± 0.30 ,是微生物适宜的活动范围,因而不会影响土壤有机质含量。

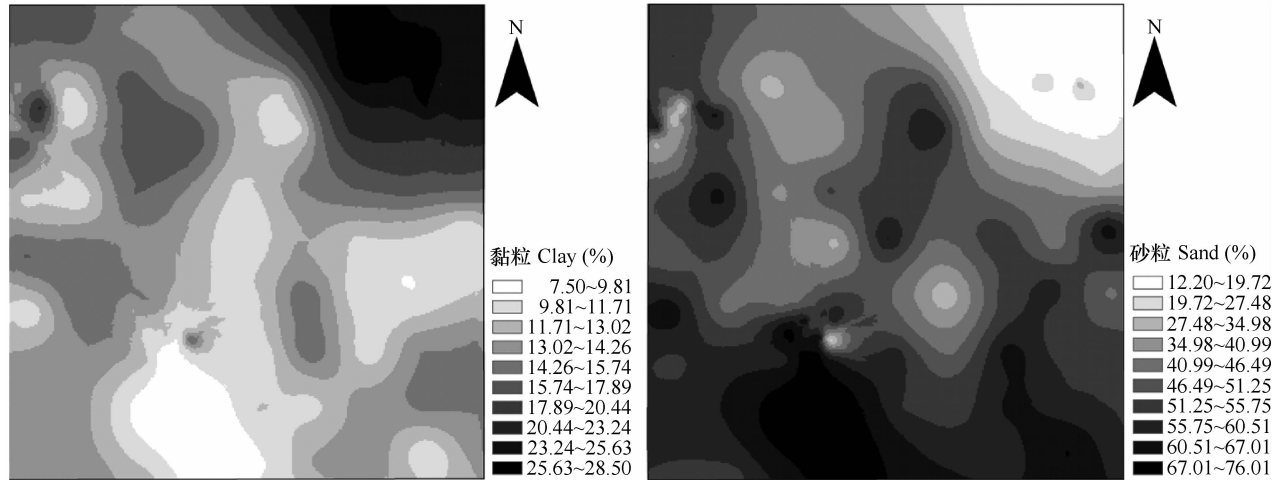


图 7 土壤黏粒(左)和砂粒(右)含量空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of clay (left) and sand (right) content

表 5 不同成土母质和土种的土壤有机质含量和机械组成

Table 5 Soil organic matter contents and mechanical compositions of soils different in parent materials and soil types

		样本数	土壤有机质	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量
		Sample size	SOM (g kg^{-1})	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
成土母质	泻湖相沉积物	42	31.16 ± 3.54	7.52 ± 3.55	67.78 ± 2.84	24.71 ± 4.39
Parent material	Lagoon sediments					
	含碳酸盐的河流冲积物	126	18.68 ± 5.51	19.31 ± 7.08	67.13 ± 5.67	13.55 ± 4.44
	Carbonate-containing alluvial deposits					
土壤类型	淤土	60	$28.15 \pm 6.25\text{a}^1$	$9.83 \pm 5.22\text{c}$	$68.19 \pm 3.34\text{ab}$	$22.00 \pm 6.05\text{a}$
Soil types	Silt soil					
	两合土	57	$20.56 \pm 5.53\text{b}$	$17.01 \pm 5.71\text{b}$	$69.06 \pm 4.87\text{a}$	$13.92 \pm 4.76\text{b}$
	Yellow fluvo-aquatics soil					
	砂土	18	$16.09 \pm 4.32\text{bc}$	$23.99 \pm 7.72\text{a}$	$64.58 \pm 6.43\text{bc}$	$11.43 \pm 3.40\text{b}$
	Sandy soil					
	盐化土	30	$15.75 \pm 4.01\text{bc}$	$23.02 \pm 7.28\text{a}$	$63.80 \pm 5.68\text{c}$	$13.17 \pm 3.73\text{b}$
	Salinized soil					
	盐碱化土	3	$13.31 \pm 1.98\text{c}$	$22.40 \pm 7.03\text{a}$	$67.00 \pm 1.65\text{abc}$	$10.57 \pm 5.57\text{b}$
	Saline-alkaline soil					

注:1)同一列数据后小写字母不同者表示差异显著($p < 0.05$);淤土、两合土、砂土为石灰淡色潮湿锥形土;盐化土和盐碱化土为弱盐淡色潮湿锥形土 Note: 1) Values followed by the different lowercase letter in same column are significantly different ($p < 0.05$); silty soil, yellow fluvo-aquatic soil and sandy soil belong to Calcaric Ochri-Aquic Cambosols; salinization soil and saline-alkaline soil belong to Parasalic Ochri-Aquic Cambosols

利用方差分析研究各成土母质以及土壤类型间 SOM 含量的差异性,结果见表 6。在各成土母质、各土壤类型间,组间均方均大于组内均方,表明组间差异大于组内差异,不同成土母质和土壤类型间的 SOM 含量 F 检验的 p 值小于 0.001,表明各成

土母质和土壤类型间的 SOM 含量具有显著性差异 ($p < 0.001$),说明成土母质和土壤类型是影响该区域土壤 SOM 含量空间变异的重要因素。上述分析表明,成土母质主要是通过影响土壤机械组成和物质基础来影响 SOM。

表 6 不同成土母质和土种间土壤有机质含量方差分析

Table 6 Variance analysis of soil organic matter of soils different in parent material and soil type

	方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F	p
	Source of variation	Sum of square	df	Mean square		
成土母质 Parent material	组间 Between groups	4 903.46	1	4 903.46	188.71 **	0.000
	组内 Within groups	4 313.35	166	25.98		
	总体 Total	9 216.80	167			
土壤类型 Soil types	组间 Between groups	4 411.23	4	1 102.81	37.41 **	0.000
	组内 Within groups	4 805.58	163	29.48		
	总体 Total	9 216.80	167			

** $p < 0.001$

2.4.3 土地利用对土壤有机质空间变异的影响 土地利用方式是 SOM 的重要影响因素之一^[2]。不同的土地利用方式,管理措施、凋落物量和质量的差异导致土壤有机质差异。研究区土地利用主要为旱地和水田(图 3),分别占区域总面积的 48.94% 和 30.90%,样品采集主要在水田和旱地中。表 7 和表 8 为不同土地利用下 SOM 含量的分析结果与方差分析结果。由表 7 看出,不同水田和旱地 SOM 含量

差异较大,水田的 SOM 含量均值为 29.24 g kg^{-1} ,旱地只有 17.67 g kg^{-1} ,只相当于水田的 60.50%;而旱地 SOM 含量的 CV 为 27.84%,是水田的 1.6 倍,研究区内旱地 SOM 变异较水田的变异强烈,许泉等研究全国不同土地利用方式下农田土壤有机碳密度区域差异时也发现了相似的规律^[35],这表明相同的区域条件下水田利用方式下 SOM 含量较为稳定,较旱地更易于 SOM 的累积和土壤固碳。

表 7 不同土地利用方式下土壤有机质含量

Table 7 Statistical characteristics values of soil organic matter in soils different in land use

土地利用 Land use	样本数 Sample size	范围 Range	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)
		(g kg ⁻¹)			
水田 Paddy field	60	16.12 ~ 38.45	29.24	4.98	17.03
旱地 Dry land	108	7.42 ~ 33.20	17.67	4.92	27.84

由表 8 知不同土地利用类型间,组间均方大于组内均方,表明组间差异大于组内差异,不同土地利用方式间的 SOM 含量 F 检验的 p 值小于 0.001,不同土地利用方式间的 SOM 含量具有显著性差异 ($p < 0.001$)。根据采样时与农户访谈知,为了追求作物产量,当地普遍使用化肥和复合肥,有机肥施用量很少;当地的水田普遍实行水旱轮作,根茬残留量大,留茬高度基本在 15 cm 以上,秸秆还田现象较普遍,有机物质归还量较高,大部分被微生物稍经分解即转化为腐殖质储存于土壤中,水田所处地

势低,土壤长期处于滞水状态,由于嫌气分解,土壤有机质的分解速率明显低于其他利用方式,有利于有机质的积累。此外,由图 3 可见研究区内水田主要分布在东北部,土壤质地黏重,黏粒含量高,也有助于有机物质的累积。因此,对于徐淮黄泛平原,大力推行水旱轮作、秸秆还田、增施有机肥是提高区域固碳能力和土壤肥力的有效途径。而对于旱地,多数田块的作物秸秆是田间直接焚烧,仅部分是还田,这是造成土壤有机碳含量较低且空间变异较大的原因。

表 8 不同土地利用方式下土壤有机质含量方差分析

Table 8 Variance analysis of soil organic matter in soils different in land use

	方差来源	偏差平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
	Source of variation	Sum of square	df	Mean square		
土地利用	组间	5 161. 89	1	5 161. 89	211. 317 **	0. 000
Land use	Between groups					
组内		4 054. 91	24. 43			
Within groups						
总体 Total		9 216. 80	167			
Total						

** $p < 0. 001$

2.4.4 不同因素对土壤有机质空间变异的影响程度 方差分析虽然能定性说明各因子对 SOM 含量影响的差异性,但不能定量比较各因子对 SOM 含量的影响程度。因此,分别以土壤机械组成、成土母质、土壤类型和土地利用为自变量,以 SOM 含量为因变量进行逐步回归分析,定量研究各因子对 SOM 含量空间变异的综合解释能力和不同因子对 SOM 空间变异影响的相对重要性。表 9 为各因子对 SOM 含量逐步回归分析结果。

表 9 研究区各因子对土壤有机质含量逐步回归分析结果

Table 9 Stepwise regression analysis of factors contributing to the variability of SOM content

影响因子	土壤有机质 SOM			
	$R^2_{\text{§}}$	ΔR^2	$R^2_{\text{偏}}$	R^2_{adj}
Impact factors				0. 746
土壤机械组成				
Soil texture	0. 107	0. 649	0. 727	
成土母质				
Parent material	0. 712	0. 034	0. 118	
土壤类型				
Soil types	0. 727	0. 019	0. 069	
土地利用				
Land use	0. 679	0. 065	0. 202	

表中, $R^2_{\text{§}}$ 为除该变量外的其他变量对 SOM 进行逐步回归的判定系数; ΔR^2 为在其他变量的基础上增加该变量时,回归方程判定系数的增量, ΔR^2 越大,说明该变量在回归方程中越重要; $R^2_{\text{偏}}$ 为偏确定系数,是指新加入回归方程的变量所解释部分占缺少该变量的回归方程未能解释部分的比例大小,也是判断自变量重要性的指标之一; R^2_{adj} 为调整确定系数,指回归方程中的所有自变量对因变量变异性的解释比例。由 $R^2_{\text{§}}$ 、 ΔR^2 和 $R^2_{\text{偏}}$ 可知,土壤机械组成对研究区内 SOM 空间变异的影响最大,能够独

立解释空间变异的 64.9%,其次是土地利用方式、成土母质、土壤类型,这四者合计能够解释 74.6%。实质上,成土母质和土壤类型对土壤有机质的影响,就是通过非人为影响因素土壤机械组成而表现出来,而土地利用是通过土壤机械组成以及人为影响因素秸秆还田表现出来。

此外,潮地下水季节性升降频繁,干湿交替过程和氧化还原过程交替进行,这也会影响到其有机质的物质累积与分解。因此,地下水位和微地形的差异会造成土壤水分空间分布的差异,会影响到微生物的种群及其活性,进而会导致土壤有机质的矿质化与腐殖化影响 SOM 含量,这方面还有待于研究。

3 结 论

1) 研究区 SOM 含量为 $21.80 \pm 7.43 \text{ g kg}^{-1}$,处于中等水平。SOM 具有强烈的空间变异,结构变异占主导作用,各向异性显著,其中在东北—西南方向上变异程度最剧烈。

2) SOM 空间分布呈条带状分布,自东北向西南呈递减趋势,土壤机械组成是研究区 SOM 含量空间变异的主控因子,其次是土地利用、成土母质、土壤类型。

3) 提升区域土壤固碳能力和肥力,需要进行分区管理:西南部主要是旱地,应增施有机肥,强化秸秆还田;东北部水田区坚持水旱轮作和秸秆还田。

参 考 文 献

- [1] 史舟,李艳. 地统计学在土壤学中的应用. 北京:中国农业出版社,2006:109—112. Shi Z, Li Y. Geostatistics and its application in soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2006: 109—112
- [2] 黄昌勇. 土壤学. 北京:中国农业出版社,2000:32—39. Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 32—39.

- ture Press, 2000: 32—39
- [3] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2005: 122—123. Chen H M. Environmental soil science (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005: 122—123
- [4] Cann M D, Hummel J W, Brouer B H. Spatial analysis of soil fertility for site specific crop management. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1 240—1 258
- [5] Weindorf D C, Zhu Y. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: Implications for sampling strategy. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 185—197
- [6] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1 501—1 511
- [7] Kuzel S, Nydl V, Kolár L, et al. Spatial variability of cadmium, pH, organic matter in soil and its dependence on sampling scales. *Water, Air and Soil Pollution*, 1994, 78(1/2): 51—59
- [8] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region. *Indian Journal Forest*, 1995, 18(2): 144—152
- [9] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. *生态学报*, 2008, 28(3): 946—954. Lian G, Guo X D, Fu B J, et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 946—954
- [10] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. *生态学报*, 2004, 24(12): 2 776—2 781. Huang Y F, Zhou Z Y, Yuan X Y, et al. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2 776—2 781
- [11] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异——以云南小江流域为例. *生态学报*, 2007, 27(5): 2 040—2 047. Jiang Y J, Yuan D X, Xie S Y, et al. Spatial variability of soil organic matter content in a typical karst watershed: Case study of Xiaojiang watershed, Yunnan Province (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2 040—2 047
- [12] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 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. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(1): 64—67. Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial variance and distribution of total nitrogen and organic matter of soil in Xingguo County of Jiangxi, China (In Chinese). *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(1): 64—67
- [13] 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. *土壤学报*, 2011, 48(4): 863—868. Li T, Zhang S R, Liu X, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang River Basin (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 863—868
- [14] 单树模, 王维屏, 王庭槐. *江苏地理*. 南京: 江苏人民出版社, 1980: 116—117. Shan S M, Wang W P, Wang T H. *Geography of Jiangsu Province* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu People's Publishing Ltd, 1980: 116—117
- [15] 江苏省土壤普查办公室. *江苏土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1995: 540—550. Office of Soil Survey in Jiangsu Province. *The soil of Jiangsu Province* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995: 540—550
- [16] 杨艳丽, 史学正, 王果, 等. 江苏北部土壤属性空间分异及其影响因素研究. *土壤通报*, 2009, 40(3): 465—469. Yang Y L, Shi X Z, Wang G, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and their affecting factors in the Northern Jiangsu Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3): 465—469
- [17] 沛县土壤普查办公室. *江苏省沛县土壤志*. 南京: 江苏省土壤普查办公室, 1986: 1—10. Office of Soil Survey in Peixian County. *The soils of Peixian County* (In Chinese). Nanjing: Office of Soil Survey in Jiangsu Province, 1986: 1—10
- [18] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 108—109. Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 108—109
- [19] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用. *数理医学杂志*, 2006, 19(1): 51—53. Li L X, Gao Y H, Zhang Y. The application of dummy variable in statistics analysis (In Chinese). *Journal of Mathematical Medicine*, 2006, 19(1): 51—53
- [20] 曹志洪, 周建民, 等. *中国土壤质量*. 北京: 科学出版社, 2008: 66—67. Cao Z H, Zhou J M, et al. *Soil quality of China* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 66—67
- [21] 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. *农业工程学报*, 2005, 21(8): 11—16. Hu W, Shao M A, Wang Q J. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8): 11—16
- [22] 王政权. *地统计学及其在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999: 135—149. Wang Z Q. *Geostatistics and its application in ecology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999: 135—149
- [23] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究. *地理科学*, 2009, 29(6): 869—873. Yang F, Zhang G X, Yin X R, et al. Spatial variability of soil salinity and alkalization and its correlation with micro-topography in the West of Songnen Plain (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(6): 869—873
- [24] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例. *土壤学报*, 2007, 44(1): 33—40. Zhong X L, Zhou S L, Li J T, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta — A case study of Taicang City, Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 33—40
- [25] Goovaerts P. *Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives*. *Geoderma*, 1999, 89: 1—45
- [26] ESRI Inc. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. 2001: 189—193
- [27] Anderson D W, Paul E A. Organo-mineral complexes and their study by radiocarbon dating. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48: 298—301

- [28] 王茹, 张凤荣, 王军艳, 等. 潮土区不同质地土壤的养分动态变化研究. 土壤通报, 2001, 32(6): 255—257. Wang R, Zhang F R, Wang J Y, et al. Temporal changing of plant nutrients in different texture soils in the north China Plain (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(6): 255—257
- [29] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. Global Biogeochem Cycles, 1994, 8: 279—293
- [30] Hook P B, Burke I C. Biogeochemistry in a shortgrass landscape: Control by topography, soil texture, and microclimate. Ecology, 2000, 81(10): 2 686—2 703
- [31] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. Soil Sci Soc Am J, 1987, 51: 1 173—1 179
- [32] Oades J M. The retention of organic matter in soils. Biogeochem, 1988, 5: 35—70
- [33] Brejda J J, Mausbach M J, Goebel J J, et al. Estimating surface soil organic carbon content at a regional scale using the National Resource Inventory. Soil Sci Soc Am J, 2001, 65(3): 842—849
- [34] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究. 土壤通报, 2005, 36(5): 748—752. Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, et al. A review on protection capacity of soil organic matter by fine particles (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(5): 748—752
- [35] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同土地利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2 505—2 510. Xu Q, Rui W Y, He H, et al. Characteristics and regional differences of soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China (In Chinese). Scientia Agricultural Sinica, 2006, 39(12): 2 505—2 510

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ORGANIC MATTER AND ITS DOMINATING FACTORS IN XU-HUAI ALLUVIAL PLAIN

Zhao Mingsong^{1,2} Zhang Ganlin^{1†} Wang Decai^{1,3} Li Decheng¹ Pan Xianzhang¹ Zhao Yuguo¹

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

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract In an agricultural ecosystem, soil organic matter (SOM) is an index key to estimating soil C sequestration, soil fertility and quality, etc. Estimation of these soil properties at an acceptable level of accuracy is very important. In this research, a square area (116°45'32" ~ 117°2'14"E, 34°31'12" ~ 34°45'6"N), about 580 km², was chosen as an example in the northwest of the Xu-Huai alluvial plain (Xuzhou and Huaiyin). A total of 168 soil samples were collected according to nested scenario's, for analysis of SOM content and soil texture. And furthermore, spatial variability of SOM in the surface layer of this region was analyzed using the geostatistics and GIS method, and its dominating factors, too, by means of variance analysis and regression analysis. Descriptive statistics of the results shows that the SOM content of the region varying in the range of 21.80 ± 7.43 g kg⁻¹ with a variation coefficient being 34.08%, both belonging to a moderate level. Geostatistical analysis suggests that the study area was very strong in spatial autocorrelation and structural factors played a dominating role in spatial variability of SOM, which was significant in anisotropy. The variation at 45° in direction was the most severe. SOM in the area was distributed in a band, decreasing from northeast to southwest. Variance analysis and stepwise regression analysis indicates that mechanical composition of the soil was the dominating factor, which alone could explain 64.9% of the SOM spatial variability of the region, and land use, parent material and soil type followed in role. The four factors together could explain 74.6% of the variability of SOM in the study area.

Key words Soil organic matter; Spatial variability; Influencing factors; Geostatistics; Stepwise regression

(责任编辑:陈德明)