

上海市城郊土壤有机质的时空变异特征及其影响因素^①

周睿^{1,2}, 潘贤章^{1*}, 王昌坤^{1,2}, 刘娅^{1,2}, 李燕丽^{1,2}, 石荣杰^{1,2}, 解宪丽¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了深入了解城市化对城郊农业土壤有机质变化的影响, 本研究运用 GIS 和地统计学结合的方法, 对上海市土壤有机质的时空变异规律及其驱动因子进行了探讨。研究表明, 土壤有机质在整个研究区内表现出中等程度变异, 土壤有机质含量分布呈现出西南高, 东部低的特点。1980—1999 年土壤有机质含量增加, 而 1999—2010 年土壤有机质含量下降。1999—2010 年, 由水田变为蔬菜地、苗圃时, 土壤有机质含量分别下降 6.72 g/kg 和 6.15 g/kg, 而水田保持不变时, 仅下降了 1.51 g/kg。通过空间叠加分析可知, 1999—2010 年, 上海市大部分地区土壤有机质含量呈减少趋势, 只有北部、南部和西南的部分地区的土壤有机质含量有所增加。土壤有机质增加的区域离城市较远, 而土壤有机质下降区域位于近郊, 主要原因是近郊部分水田转化为蔬菜地和苗圃, 土地利用方式改变导致了作物根茬和秸秆还田减少, 同时有机质分解加快, 因此引起了土壤有机质积累下降。

关键词: 城郊土壤; 土壤有机质; 时空变异; 上海市

中图分类号: S153

有机质是土壤的重要组成部分, 是衡量土壤肥力和土壤质量的重要指标^[1]。土壤有机碳库也是陆地碳库的重要组成部分, 全球土壤有机碳库约为 1 500 Pg, 约为大气碳库的 2 倍, 土壤中有机质含量的变化会影响大气中 CO₂ 的浓度, 进而影响全球气候变化^[2-3]。研究土壤有机质的时空变化及其原因, 对于了解全球变暖机制, 保障土壤质量, 实现农业土壤可持续利用具有重大意义^[4]。

农田土壤有机质的时空变异特征一直是土壤有机质研究的热点^[5-10]。朱静等^[11]的研究表明, 如皋市农田土壤有机质含量在 1982—1997 年增长较快, 在 1997—2002 年增速变缓。陆访仪等^[12]的研究表明, 海伦市农田土壤有机质含量在 1981—2000 年下降较多, 而在 2000—2008 年下降幅度减小。秦静等^[13]的研究表明, 北京大兴区农田土壤有机质含量在 1981—2000 年增长, 而在 2000—2006 年下降。罗明等^[14]的研究表明, 江西余江县农田土壤有机质在 1981—1998 年含量增长, 而在 1998—2001 年含量下降。

大城市边缘区的土地利用类型变化剧烈, 势必引起土壤有机质变化^[13]。刘明庆等^[15]提出, 在城市

扩展过程中, 城郊农田从过去单一的生产功能产业逐步转变为具有生态、休闲、社会等新型功能的复合系统。王美青等^[16]的研究表明, 城郊农田土壤因受人为活动的影响较大, 土壤属性更容易发生改变。上海市是我国城市扩展最快的地区之一, 随着城市化进程的加快, 农业土壤的面积急剧减少, 而且由于种植结构变化及承包制度改变, 土壤质量发生了很大变化。本文研究上海市土壤有机质含量的时空变异, 并对驱动因素进行初步探讨, 有助于更进一步了解我国城市扩展最快地区城郊农业土壤肥力变化规律, 并为该区域土壤质量管理和农业可持续发展提供帮助。

1 研究区域概况

本研究选择上海市(不含崇明县)作为研究区, 面积约 5 146 km², 其中农业土壤占 52%。研究区地理位置 30°40′~31°53′N, 120°51′~122°12′E, 地处太平洋西岸, 亚洲大陆东沿, 长江三角洲前缘, 东濒东海, 南临杭州湾, 西接江苏、浙江两省, 北界长江入海口, 长江与东海在此连接。该地区属于北亚热带季风性气候, 四季分明, 日照充分, 雨量充

基金项目: 中国科学院战略先导性项目(XDA05050509)和国家自然科学基金项目(41071140)资助。

* 通讯作者(panxz@issas.ac.cn)

作者简介: 周睿(1978—), 男, 江苏连云港人, 博士研究生, 主要从事土壤遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: rzhou@njbas.ac.cn

沛,气候温和湿润,春秋较短,冬夏较长。近几十年来,尤其是沿海开放战略实施以来,上海地区经济发展迅速,土地利用呈现明显的高强度开发特征。

根据第二次全国土壤普查资料,该市共有 4 个土类,7 个亚类,24 个土属,96 个土种,其中分布最广的土属依次为黄泥土、青紫泥土、黄夹砂土、潮砂泥土以及滨海盐土,面积分别占总面积的 8.7%、6.6%、6.3%、5.7% 和 5.5%。上海市耕作模式以水稻-小麦轮作为主。由于城市扩展,研究区域耕地面积在 1980—1999 年减少了约 7 万 hm^2 ,而在 1999—2010 年减少了约 9 万 hm^2 。在 1999 年以前农田大多是以家庭承包种植为主,而 1999 年以后逐渐实行规模化种植。为了追求经济效益和社会效益,很多土地逐步由水田转化为蔬菜地和苗圃。

2 材料与方法

2.1 土样采集和分析

本研究收集了第二次全国土壤普查的 78 个土壤剖面数据,以及“973”土壤质量项目提供的 227 个水田样点数据(1999 年采集)。2010 年根据 1999 年的定位坐标,利用 GPS 导航对各采样点进行了重新调查和采样。每一采样点采集 0~20 cm 的表层土壤,由 3~5 个点混合而成。野外采样的同时对农户进行访谈,记录其有关的土地利用情况、种植制度、施肥状况、水利设施、灌溉水源、灌溉制度、平均单产等信息。经实地调查发现,1999—2010 年已有 85 个采样点变成了城市建设用地,因此,本研究只对剩余的 131 个样点进行了样品采集(图 1)。将取得的土样在室内自然风干后混匀碾碎,过 0.25 mm 筛,装瓶备用。土壤有机质测定采用重铬酸钾加热法测定^[17]。

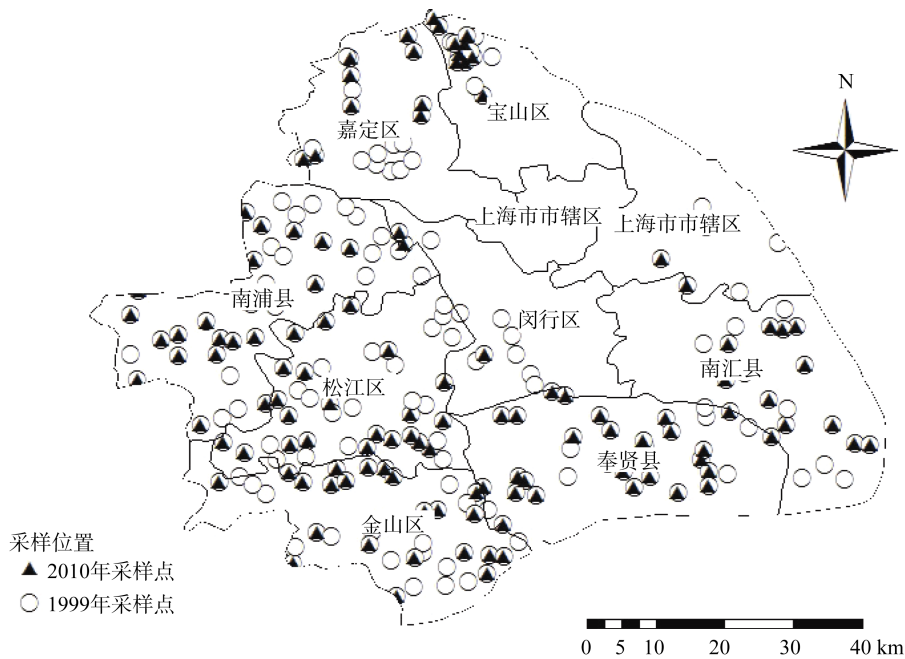


图 1 土壤样点分布

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in the study area

2.2 数据处理方法

2.2.1 地统计学方法 地统计学是研究空间变异性的一种重要方法,该方法是以区域化变量为核心和理论基础,以半方差函数、空间相关为基本工具的一种数学地质方法。其中,半方差函数是地统计学中研究土壤变异的关键参数,反映了不同距离观测值之间的变化。半方差函数在零点处的数值称为块金值(C_0),表示因实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异,基台值(C_0+C)表示系统内的总变异,半方差函数达到基台值的间隔距离称为变程(A),当大于变程时,变量的空间相关性消失。由于样点均为非网格

采样,所以在试验半方差函数的理论模型拟合中,通过各种不同的步长间距及拟合参数调整,使理论模型最为逼近试验半方差函数。为了便于对研究区域内的插值数据进行分析,本文采用了 GS+与 ArcGIS 相结合的方法,首先将数据导入到 GS+中获取最佳半方差函数模型参数,然后在 ArcGIS 中利用普通克里格法调整参数,建立土壤有机质空间分布插值图。

2.2.2 数理统计方法 使用 SPSS 软件对数据进行统计分析。按标准差的倍数识别异常值,正常值范围定位为样品均值加减 3 倍标准差,超出范围的即为异常值^[14],再对异常值进行剔除处理。

3 结果和讨论

3.1 土壤有机质的变化特征

对3个时期的土壤有机质数据进行检验,1999年和2010年分别有2个样点和1个样点数据值明显超出正常范围,因此,对这些点进行剔除。据统计结果,3个时期土壤有机质基本符合正态分布,且属于中

等程度变异(表1)。1980年、1999年、2010年3个时期的土壤有机质的平均含量分别为26.41、31.20和27.14 g/kg,按照第二次全国土壤普查有机质分级表^[18],分别属于三级、二级和三级。土壤有机质从1980—1999年增加了4.79 g/kg,而从1999—2010年减少了4.06 g/kg。1980年与1999年,1999年与2010年数据之间均具有显著性差异。

表1 3个时期土壤有机质描述性统计结果
Table 1 Descriptive statistics of soil organic matter content in three periods

时间	样品数量	平均值 (g/kg)	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	标准差	变异系数 (%)	偏度	峰度
1980年	78	26.41	9.6	54.6	10.5	39.8	0.896	0.427
1999年	225	31.20 ^a	11.0	49.8	7.6	24.4	0.093	-0.369
2010年	130	27.14 ^a	7.4	58.1	10.5	38.6	0.457	0.112

注：表中a表示双侧显著度水平为0.000。

上海市郊区农业土壤有机质变化呈现了前升后降的现象。原因是,在20世纪80年代,上海市的耕作方式较为粗放,大都采用人工收割,作物收割后留茬高度很低,而且秸秆大多用于焚烧。而随着农业机械化程度的提高,收割机在收割作物时都会留茬较高,同时也会自动将秸秆打碎还田,政府也认识到秸秆还田的重要性,对秸秆焚烧进行了限制,从而造成了有机物质投入量大大提高,土壤有机质含量随之增加。然而近年来,随着城市扩展以及随之而来的土地利用方式变化,比如水田变为蔬菜地和苗圃,农业土壤缺少了作物根茬、秸秆还田等有机物质来源,有机质含量明显降低。这些原因将在后文做进一步的分析和探讨。

3.2 土地利用方式变化的影响

将1999年和2010年重合的采样点的土壤有机质按土地利用方式进行统计(表2)。由表2可知,当土地利用方式由水田变为蔬菜地或苗圃时,2010年土壤有机质含量比1999年分别下降了6.72 g/kg和6.15 g/kg,对数据分别进行配对检验发现,这两种变化方式的双侧显著度水平均小于0.05,有统计的显著性意义。而土地利用方式保持不变的时候,土壤有机质含量仅下降了1.51 g/kg,双侧显著度水平大于0.05,没有统计上的显著差异。这说明土地利用方式变化是1999—2010年土壤有机质含量下降的一个主要原因。

表2 不同土地利用方式下土壤有机质变化配对检验
Table 2 Paired samples test of soil organic matter changes under different land use types

土地利用方式	样品数量	2010年均值 (g/kg)	1999年均值 (g/kg)	1999年与2010年差值 (g/kg)	<i>t</i>	双侧显著度水平
水田-蔬菜地	20	23.65	30.37	-6.72	2.640	0.016
水田-苗圃	35	24.20	30.34	-6.14	4.081	0.000
水田-水田	71	30.93	32.42	-1.51	1.526	0.132

3.3 土壤有机质地统计学分析

进行半方差函数分析时,判断模型的拟合精度一般要求决定系统 R^2 最大,残差RSS最小,而土壤性质的空间相关性可由 $C_0/(C_0+C)$ 比值的大小进行划分^[13]。由于1980年第二次土壤普查时采样没有记录经纬度,因此,只对1999年和2010年采样点数据进行地统计学分析。由表3可知,本研究所有半方差函数模型的确定系数均较大,说明模型的选取符合要求。研究显示,1999年和2010年的变程值分别为30.27 km和64.20 km,说明土壤有机质在较大空间范围内具有相关性。1999年土壤有机质含量的 $C_0/(C_0+C)$ 比值分

别为19.1%,表现为较强的空间相关性;而2010年土壤有机质含量的 $C_0/(C_0+C)$ 比值达到了45.6%,空间相关性比1999年明显降低。空间相关性的变化实际上与研究区的自然因素和人为因素有关。一般认为,结构性因素,如气候、母质、地形、土壤类型等自然因素可以导致土壤有机质强的空间相关性,而随机性因素,如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤有机质的空间相关性减弱^[19]。根据调查,在1999—2010年,研究区域土地利用变化较大,耕作措施、种植制度也较以往发生了改变,进而导致了土壤有机质空间相关性下降。

表 3 最优半方差函数模型拟合参数值
 Table 3 Parameters of best-fitted semivariogram model

时间	模型	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)(\%)$	$A(km)$	R^2	RSS
1999 年	指数	13.9	72.8	19.1	30.27	0.965	103
2010 年	指数	61.1	134.0	45.6	64.20	0.748	1 609

分别对两个时期的土壤有机质含量进行空间插值,得到 1999 年、2010 年的土壤有机质空间插值图(图 2)。

从图 2 可以看出,土壤有机质 1 级(有机质含量 >40 g/kg)和 2 级有机质含量(30 ~ 40 g/kg)的区域大多

分布在西南地区。而东部地区土壤有机质大多为 3 级(有机质含量 20 ~ 30 g/kg)和 4 级(有机质含量 10 ~ 20 g/kg)。造成这种现象的主要原因是上海市西南地区的土壤类型主要是青紫泥土和黄泥土,质地较黏,农业利用较早,有机质含量高。而东部地区的主要土

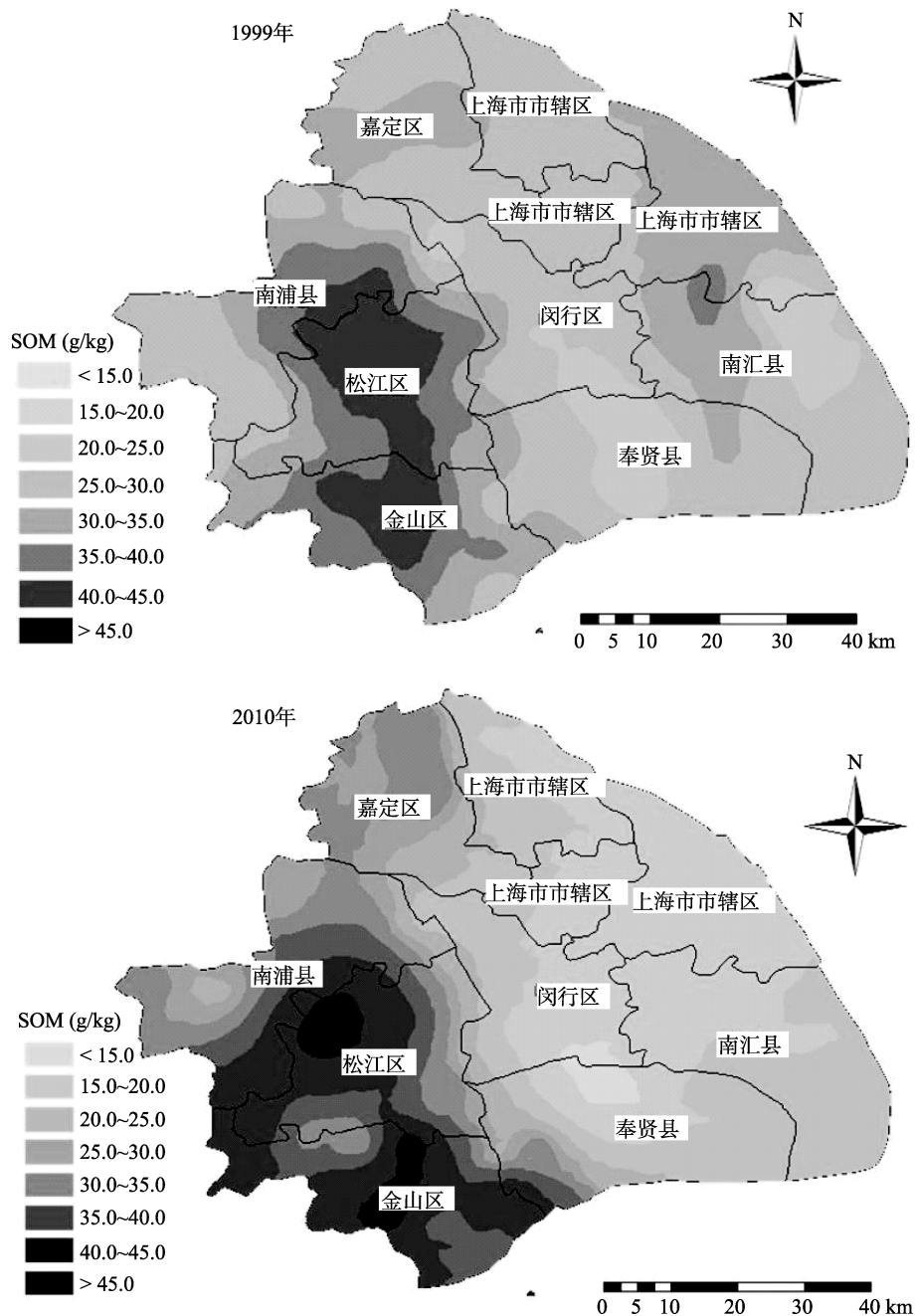


图 2 土壤有机质空间分布图
 Fig. 2 Spatial distribution of soil organic matter

壤类型为黄夹砂土、砂夹黄土,这类土壤沉积较晚,质地较粗,黏粒含量低,土壤通气性好,有机质分解快,不易积累^[12]。

将2010年与1999年土壤分布图相减,得到1999年至2010年土壤有机质含量变化空间分布图(图3)。从图3中可以看出,上海市大部分地区土壤有机质含量呈减少趋势,只有北部、南部和西南地区的土壤有机质含量有所增加。有机质增加的区域或者减少幅度

很小的区域离城市较远,这些区域都是传统的农业区,土地利用仍然以水田为主,近10年来种植方式基本不变;而有机质减少较多的区域大都离城区较近,农业土壤利用方式发生了较大改变,部分水田变为蔬菜地或者苗圃。这种变化可能主要由两方面原因共同造成:一方面,农业土壤缺少了作物根茬、秸秆还田等有机物质投入来源;另一方面,土地利用方式改变后,诸如深翻耕作等农业措施加快了土壤有机质的矿化。

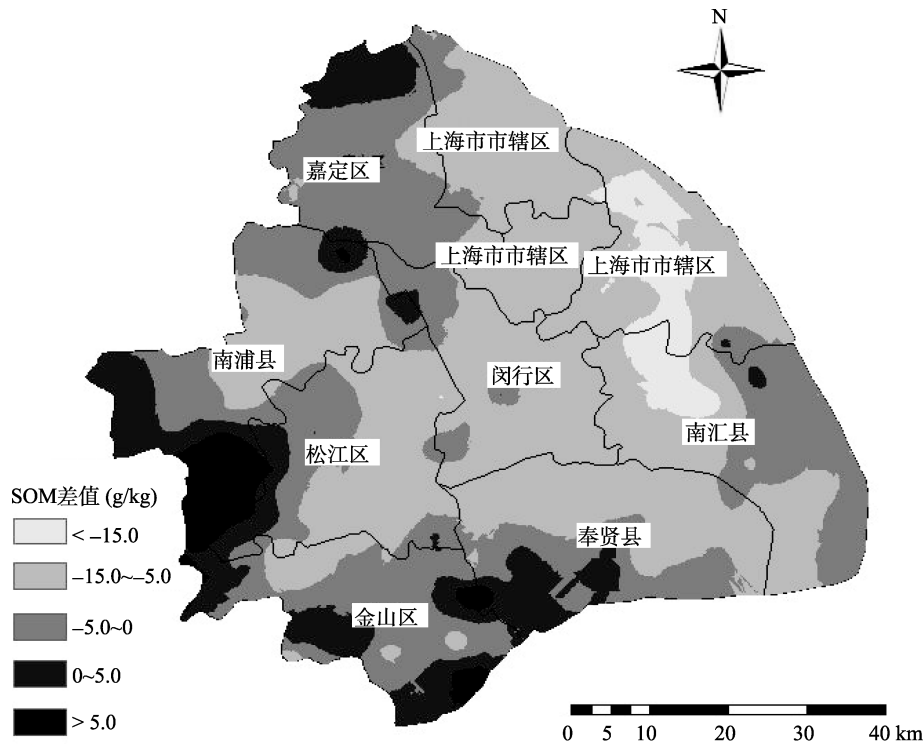


图3 土壤有机质含量变化空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil organic carbon changes

4 结论

(1) 上海市的农业土壤有机质在整个研究区内表现出中等程度变异,土壤有机质含量分布呈现出西南高,东部低的特点。

(2) 1980—1999年上海市农业土壤有机质含量从26.41 g/kg增长到31.20 g/kg,而从1999—2010年有机质含量从31.20 g/kg下降到27.14 g/kg。1999—2010年,由水田变为蔬菜地、苗圃时,土壤有机质含量分别下降6.72 g/kg和6.15 g/kg,且具有统计学意义。而水田保持不变时,仅下降了1.51 g/kg,没有统计上的显著差异。

(3) 1999—2010年土壤有机质增加的区域离城市较远,而土壤有机质下降区域位于近郊。近郊土地利用方式发生了改变,尤其是水田转化为蔬菜地

和苗圃时,作物根茬和秸秆还田减少,对应的农业措施改变也使有机质分解加快,导致了土壤有机质含量的下降。

参考文献:

- [1] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 高峻. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2 041-2 047
- [2] Janzen HH, Campbell CA, Ellert BH. Soil organic matter dynamics and their relationship to soil quality[A]. //Gregorich EG, Carter MR. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health, Amsterdam[M]. The Netherlands: Elsevier Scientific Publ. Co., 1997: 277-292
- [3] Eswaran H, Van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 192-194
- [4] 赵鲁全. 1985—2005年聊城市土壤有机质的时空变异分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 421-427

- [5] Gaston LA, Locke MA, Zablotowic RM, Reddy KN. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 449–451
- [6] 赵永存, 史学正, 于东升, 赵彦锋, 孙维侠, 王洪杰. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 379–385
- [7] 张金萍, 张保华, 刘子亭, 王振健, 翟胜. 山东省禹城市耕层土壤有机质含量变化的空间变异[J]. *土壤通报*, 2009, 40(2): 258–263
- [8] Tornquist CG, Gassman PW, Mielniczuk J, Elvio G, Campbell T. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in southern Brazil: integrating century and GIS with i_Century[J]. *Geoderma*, 2009, 150: 404–414
- [9] 杨玉玲, 田长彦, 盛建东, 文启凯. 灌淤土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3): 26–30
- [10] 苑小勇, 黄元仿, 高如泰, 柴旭荣, 贺勇. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 70–76
- [11] 朱静, 黄标, 孙维侠, 杨荣清, 邹忠, 丁峰, 苏健平, 黄耀, 金洋, 毕葵森. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2006, 38(2): 158–165
- [12] 陆访仪, 赵永存, 黄标, 孙维侠, 汪景宽, 王火焰. 近 30 年来海伦市耕地土壤有机质和全氮的时空演变[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 42–49
- [13] 秦静, 孔祥斌, 姜广辉, 刘怡, 李翠珍. 北京典型边缘区 25 年来土壤有机质的时空变异[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 124–129
- [14] 罗明, 潘贤章, 孙波, 宗良纲. 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
- [15] 刘明庆, 席运官. 我国城郊保留农田发展现状与趋势分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(25): 15 629–15 631, 15 635
- [16] 王美青, 章明奎. 杭州市城市和郊区各功能区土壤的性质比较[J]. *浙江农业学报*, 2004, 16(6): 377–380
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
- [18] 全国土壤办公室编著. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [19] 刘慧屿, 魏丹, 汪景宽, 李双异, 迟凤琴. 黑龙江省双城市土壤有机质和速效养分的空间变异特征[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006(2): 195–199

Spatial-temporal Variation Characteristics of Soil Organic Matter and Its Impact Factors in Suburban Shanghai

ZHOU Rui^{1,2}, PAN Xian-zhang^{1*}, WANG Chang-kun^{1,2}, LIU Ya^{1,2}, LI Yan-li^{1,2},
SHI Rong-jie^{1,2}, XIE Xian-li¹

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to understand the effect of city expansion on the soil organic matter (SOM) changes in suburban areas, GIS technology and geostatistics method were used to study the spatial and temporal variation of SOM in Shanghai and the driving factors were discussed. The results showed that SOM in the study area had a moderate variation. SOM content in the southwest areas was high but low in the eastern areas. SOM content increased from 1980 to 1999 but decreased from 1999 to 2010. From 1999 to 2010, when paddy fields converted to the vegetable fields or nursery fields, SOM content decreased 6.72 g/kg and 6.12 g/kg, respectively, but when the paddy fields kept unchanged, SOM content only decreased 1.51 g/kg. Spatial overlay analysis showed that SOM content reduced in most of the area, only increased in some areas in the north, south and southwest. The areas where SOM increased were far away from the city and the areas where SOM decreased were near the city. The main reason was when some paddy fields which near the city converted into vegetable fields or nursery fields, crop residues and straw returned decreased and the decomposition rate of SOM increased, which led to a decline of SOM content.

Key words: Suburban soil, Soil organic matter, Spatial-temporal variation, Shanghai City