

典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子 显著性变化特征研究*

王 充^{1,2} 于东升^{1,2†} 张海东^{1,2} 赵永存^{1,2} 史学正^{1,2} 王 宁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 明确不同时期农田土壤碳库及其显著影响因子对农田土壤固碳具有重要意义。基于北安和克东地区 20 世纪 80 年代初全国第二次土壤普查资料, 2010 年测土配方施肥数据和实际补充采集样品分析数据, 利用土壤类型 GIS 连接法研究土壤有机碳库及密度时空变化特征, 并采用方差分析检验不同时期土壤有机碳密度空间变异的影响因子及其显著性差异。结果表明, 研究区沟谷和低洼平地农田土壤有机碳密度及下降速率均高于漫岗高原, 表层和剖面的碳库年均下降速率为 $-0.14 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $-0.13 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 碳库储量呈现显著下降趋势。1980 年农田表层土壤有机碳密度的显著性影响因子为土壤类型(亚类)、海拔、pH 和全磷; 2010 年影响因子中土壤类型(亚类)和 pH 依然显著, 海拔和全磷不再显著, 坡度成为新的显著性影响因子。

关键词 典型黑土区; 土壤有机碳库; 土壤有机碳密度; 影响因子; 显著性

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

气候变化受到世界各国政府和研究者越来越多的关注^[1-2]。陆地生态系统中碳的生物地球化学循环影响着大气温室气体浓度和气溶胶, 进而影响气候^[3]。陆地生态系统的碳主要储存在陆地植被和土壤中, 储量分别为 640 Gt C 和 1 358 Gt C^[4], 土壤碳库储量约为陆地植被碳库的 2 倍, 是陆地生态系统碳库的重要组成部分。土壤碳库以土壤有机碳库为主^[5], 由于开垦和耕作损失的土壤有机碳(SOC)大部分以 CO_2 的形式释放至大气中^[6-8], 占人类活动释放 CO_2 的 1/4^[9-10]。明确 SOC 显著影响因子对于分析 SOC 演变机制, 建立预测模型, 增加农田碳库储量, 减缓温室气体排放均有重要意义。

我国东北黑土面积约为 $5.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[11], 是重要的土壤有机碳库。黑土 SOC 含量由未开垦前的 60 ~ 80 g kg^{-1} 下降至开垦后的 10 ~ 30 g kg^{-1} , 黑土腐殖质层厚度也由 60 ~ 70 cm 下降至 20 cm^[12], 开垦和耕作对 SOC 含量造成显著影响。黑土有机碳库由于有机质的形成量小于矿化量, 整体仍处于亏缺状态, 是大气 CO_2 的重要碳源, 也是潜在的巨大

碳汇^[13]。

东北黑土区 SOC 变化影响因子研究认为, 土壤类型是影响 SOC 含量的重要因子。Liu 等^[14]对 2003 年吉林省德惠市 354 个土壤表层样品 SOC 含量进行方差分析, 发现不同土类间 SOC 含量差异显著。Wang 等^[15]基于东北地区全国第二次土壤普查的旱地土壤剖面数据, 通过相关分析和回归分析发现土壤质地是影响 SOC 含量的重要因子。Zhang 等^[16]通过对 2007 年黑龙江省海伦市 435 个典型黑土表层样点的 SOC 含量影响因子进行分析, 发现不同海拔、坡度和坡向的样点 SOC 的含量有所差异, 地形因子和 SOC 含量关系密切。Wang 等^[17]对 2005 年吉林省农安县 451 个土壤表层样点 SOC 含量影响因子研究后发现, 当地 SOC 含量与 pH、全氮、速效磷以及速效钾间关系显著。

目前已有的东北黑土区 SOC 变化影响因子分析主要针对某一个时期。随着开垦年限的增长, 土壤有机碳库发生变化的同时, 其影响因子的显著性是否也会随之改变, 仍需研究和分析。本文采用典

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目((2010CB950702))和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050507)资助

† 通讯作者, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 王 充(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源环境与遥感信息。E-mail: chwang1987@gmail.com

收稿日期: 2013-05-28; 收到修改稿日期: 2013-11-19

型黑土区时隔 30 年的两期土壤数据,分别计算土壤有机碳密度(SOCD)和土壤有机碳库(SOCS),通过方差分析对比影响因子的显著性,探讨影响因子显著性的变化特点,旨在为土壤碳库研究提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究选取克东县和北安市作为案例区。该区位于 $47^{\circ}35' \sim 48^{\circ}33'N$, $126^{\circ}01' \sim 127^{\circ}53'E$ 之间,地处黑龙江省的中部(图 1),县域面积达 $9\ 277\ km^2$ 。该区地处中温带向寒温带过渡地区,属于大陆性季风气候,年均温分别为 $1.2\ ^{\circ}C$ 和 $0.2\ ^{\circ}C$,年均降水量分别为 $525.1\ mm$ 和 $526.4\ mm$ 。研究区地形

地貌呈现东高西低的特点,东部属于小兴安岭西麓主体,西部属于松嫩平原的一部分,主要地形为波状起伏的漫岗和高平原,坡度 10° 以下,坡长较长,集水面积大。

黑土是研究区最主要的农田土壤,皆分布于丘陵漫岗。暗棕壤主要分布在海拔 $300\ m$ 以上的高丘和低山。草甸土主要分布在河漫滩和沟谷平地,沼泽土分布在长期积水的低洼地中。成土母质主要为第四纪黄土,底土黏重,表土富含有机质,抗蚀性差。

该区土地利用类型以农田、森林为主。其中农田主要为旱地,分布于克东县全境、北安市西北部和西南部。该区垦殖时间短,耕作历史清楚,种植结构单一,在黑土区具有典型性。

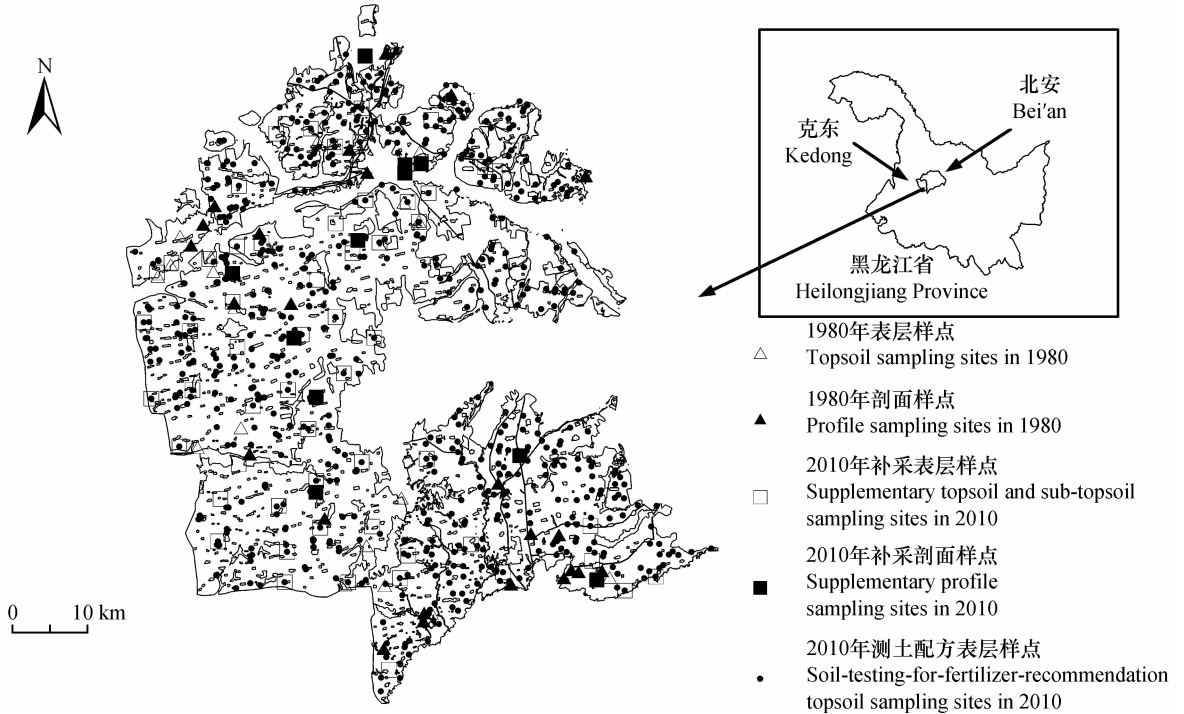


图 1 研究区地理位置及土壤样点分布

Fig. 1 Location of the study zone and distribution of soil sampling sites

1.2 数据来源

收集整理 20 世纪 80 年代初全国第二次土壤普查资料,如克东县和北安市 1:5 万土壤类型图、土种志等,共收集 44 个土壤表层样点和 30 个土壤剖面样点的数据(图 1)。收集 2010 年研究区测土配方施肥 641 个表层样点数据。为弥补测土配方施肥数据中剖面数据和容重信息的不足,增设 15 个土壤剖面采样点和 59 个表层采样点,当年通过野外实际调查与采样分析获取有关数据。其中,土壤有机质含量采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)氧化—滴定法测定,土

壤质地(颗粒组成)采用 GB7845 - 87(吸管法)测定,土壤 pH 采用电位法测定,土壤全氮采用半微量开氏法测定,土壤全磷采用氢氟酸—高氯酸—硝酸消煮—钼锑抗比色法测定,土壤容重采用环刀法采集土壤环刀样品进行测定(3 次重复)^[18]。两期样点空间分布均匀,所属土种类型齐全,在研究区具有代表性。

对掌握的数据资料进行数字化处理,分别建立 1:5 万土壤类型空间分布数据库和样点土壤属性数据库,包括经纬度、土壤类型、土壤质地和土壤肥力

等信息。同时,利用全球 30m 分辨率数字高程数据产品 (<http://datamirror.csdb.cn>, 2009), 通过 Arc-GIS10.0 软件的空间分析模块提取各样点的海拔、坡度和坡向信息。

1.3 土壤有机碳库估算及分析方法

表层(0~20 cm)和剖面(0~100 cm)土壤有机碳密度($t\text{ hm}^{-2}$)计算公式如下:

$$SOCD_D = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \delta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i}{10} \quad (1)$$

式中, $SOCD_D$ 为厚度为 D 的土层的土壤有机碳密度($t\text{ hm}^{-2}$); n 为土层数; δ_i 为第 i 层的砾石含量(直径大于 2 mm 的砾石体积百分比); ρ_i 为第 i 层的土壤容重($g\text{ cm}^{-3}$); C_i 为第 i 层土壤有机碳含量($g\text{ kg}^{-1}$),由土壤有机质含量乘以 0.58 (Bemmelen 转换系数)得到; T_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

对于缺失容重数据的样点采用相同土属其他样点的平均容重代替。2010 年测土配方施肥样点采用固定 20cm 深度采样,可直接计算表层 SOCD。而全国第二次土壤普查样点和 2010 年补测样点均按照土壤发生层次深度进行采样,在计算时取 0~20cm 内所有土层的加权属性数值。

计算每一土种包含样点的 SOCD 及其他土壤属性均值;如果土种没有样点分布,则计算同土属样点的属性均值。利用土壤类型 GIS 连接法^[19],根据土壤类型一致性原则,将由样点计算的各类型土壤属性平均值与相应类型土壤的矢量图斑连接,获得

1980 年和 2010 年表层及剖面 SOCD 及其他属性空间分布矢量图,并通过转换工具进行栅格化,分辨率参照有关研究设为 $100m$ ^[20],以保持变换前后数据精度的一致性。通过栅格计算将两期 SOCD 相减得到表层和剖面的 SOCD 变化的空间分布图。对所有图斑 SOCD 与相应面积相乘并求和得到 SOCS,SOCS 除以研究区总面积得到 SOCD 面积加权平均值。

SOCD 年均变化速率($t\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)计算公式如下:

$$M = (SOCD_t - SOCD_0) / t \quad (2)$$

式中, M 为 SOCD 年均变化速率($t\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$); t 为间隔年份,由计算终止年和起始年的差值得到; $SOCD_0$ 和 $SOCD_t$ 分别为计算起始年和终止年的 SOCD 面积加权平均值($t\text{ hm}^{-2}$)。

对 1980 年和 2010 年基于样点获得的土种 SOCD 均值进行配对 t 检验,分析表层和剖面的 SOCD 差异的显著性,验证土壤有机碳库是否发生显著性变化。

1.4 影响因子显著性分析方法

根据研究区和掌握数据资料等实际情况,选择土壤类型(土壤亚类、质地类型)、地形(海拔、坡度、坡向)、肥力(pH、全氮和全磷)等影响因子,并依据研究区范围内影响因子性质和数量水平的差异进行区间分组(表 1)。

表 1 影响因子及其分组区间
Table 1 Impact factors and grouping interval

因子类型 Type of factors	影响因子 Impact factors	分组 Grouping interval
土壤类型 Soil type	亚类 Subgroup	黑土、草甸黑土、表潜黑土、暗棕壤、白浆化暗棕壤、草甸暗棕壤、草甸土、碱化草甸土、潜育草甸土、泥炭沼泽土、草甸沼泽土和潜育水稻土 Black soil, Meadow black soil, Superficial black soil, Dark-brown earth, Albic dark-brown earth, Meadow dark-brown earth, Meadow soil, Alkalized meadow soil, Gleyed meadow soil, Peaty bog soil, Meadow bog soil, Hydromorphic paddy soil
	质地 Texture	轻黏土、砂壤土、轻壤土、中壤土和重壤土 Light clay, Sand loam, Light loam, Medium loam, Heavy loam
地形 Topography	海拔 Elevation(m)	<150, 150~200, 200~250, 250~300, >300
	坡度 Slope degree	<2°, 2°~6°, 6°~15°, 15°~25°, >25°
	坡向 Slope aspect	东北、东南、西南、西北 Northeast, Southeast, Southwest, Northwest
肥力 Fertility	pH	<5.0, 5.0~6.5, 6.5~7.5, 7.5~8.5, >8.5
	全氮 Total nitrogen($g\text{ kg}^{-1}$)	<1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0, 2.0~4.0, >4.0
	全磷 Total phosphorus($g\text{ kg}^{-1}$)	<0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5, 1.5~2.0, 2.0~2.5, >2.5

由于 1980 年表层样点数较少,2010 年表层样点充足,两个时期的土壤剖面数量均较少,通过土壤类型连接法获得的两个时期属性空间分布图在精度上有所差异,2010 年土壤表层属性空间分布精度相对较高,采用空间化土壤属性数据进行影响因子分析,不利于两个时期的对比。因此,本文利用 1980 年 44 个表层样点(0~20cm)的土壤有机碳密度及其 30 年的变化来研究其影响因子的显著性。根据 1980 年表层样点空间位置,在 2010 年土壤属性空间分布图上,利用 ArcGIS10.0 软件提取这些样点在 2010 年的土壤属性数据用于方差分析。这样两期用于分析的样点位置和数量具有一致性,可以保证分析结果的可比性。

使用 SPSS19.0 分别对各因子进行单因素方差分析,通过对比两期数据方差分析结果的统计量 F

值和显著性水平 p 值, p 值越小,该因子不同水平分组间的 SOCD 差异越显著,该因子对 SOCD 的影响也越显著。

2 结果与讨论

2.1 样点土壤有机碳密度统计特征

从 1980 年至 2010 年 30 年间,基于样点统计的表层和剖面 SOCD 算术平均值均有所下降,分别下降了 27.5% 和 22.8% (表 2)。表层和剖面样点的变异系数也有所下降,SOCD 的空间分布受人为耕作管理干扰朝均一化方向发展^[21]。1980 年和 2010 年的表层 SOCD 的偏度和峰度接近 0,说明 1980 年和 2010 年的表层 SOCD 均接近正态分布^[22],满足方差分析的前提条件。

表 2 1980 年和 2010 年 SOCD 基本特征

Table 2 Basic characteristics of SOCD in 1980 and 2010

年份 Year	深度 Depth (cm)	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	观测数 N
1980	0~20	91.9	44.0	18.7	204.8	0.48	0.70	0.91	44
	0~100	222.0	89.4	71.8	440.2	0.40	0.04	0.47	25
2010	0~20	66.6	21.6	15.1	151.8	0.32	0.82	0.84	700
	0~100	195.2	46.5	80.7	271.1	0.23	1.54	-0.86	15

2.2 土壤有机碳密度时空变化特征

1980 年和 2010 年表层和剖面 SOCD 较高区域主要位于沟谷及低洼平地的农田,而较低区域主要分布于漫岗高平原(图 2a、图 2b、图 2d、图 2e)。从 1980 年至 2010 年近 30 年间,大部分区域的表层和剖面 SOCD 呈下降趋势,且沟谷低洼平地区域快于漫岗高平原(图 2c、图 2f)。这是由于河流沟谷和地势低洼地形多发育草甸土和沼泽土,土壤有机物质易于积累,且开垦难度大,垦殖时间短,土壤有机碳初始含量高,而漫岗高平原主要发育黑土,易被流水和风力侵蚀,且地势平缓,易于开垦,耕作时间久,初始有机碳含量低。已有研究表明农田 SOC 变化量与初始碳含量呈负相关关系^[23],因此沟谷低洼区域的 SOCD 下降速率快于漫岗高平原。

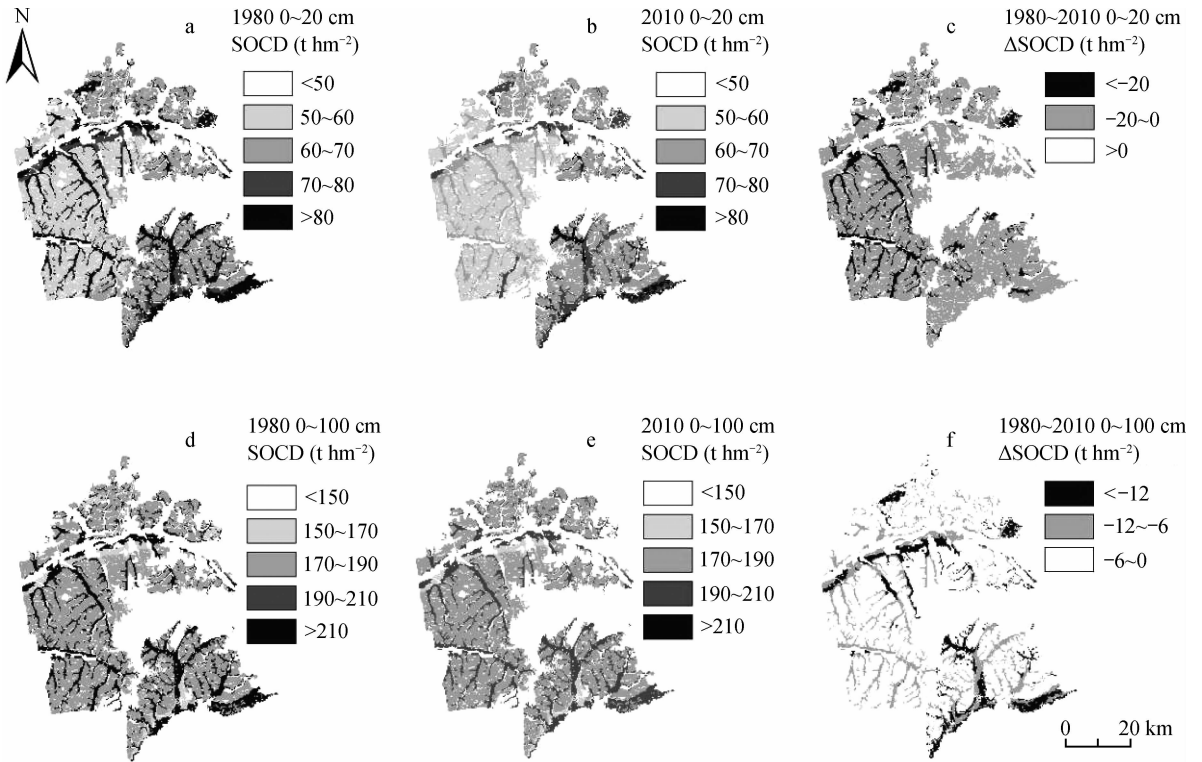
1980 年剖面 SOCD 为 192.4 t hm⁻²,表层碳库占剖面碳库的 35.2% (表 3),这与孙维侠等^[24]根据全国第二次土壤普查数据估算的黑龙省剖面有机碳平均密度 202.2 t hm⁻²,表层碳库占剖面碳

储量的 36.5% 的结果相近,研究结果在黑龙省具有代表性。从 1980 年至 2010 年近 30 年间,表层和剖面 SOCD 的年均变化速率分别为 -0.14 t hm⁻² a⁻¹ 和 -0.13 t hm⁻² a⁻¹,研究区耕地仍处于持续丢碳的过程。

对两期数据相同土种 SOCD 的配对 t 检验表明,1980 年的表层及剖面 SOCD 与 2010 年相比,均在 $p < 0.01$ 的显著性水平上存在差异,研究区 SOCD 和 SOCS 均发生了极显著的减少。因此,需要加强农田管理,增加作物秸秆和根茬的还田比例,增施有机肥料,减缓碳损失速率,保持黑土肥力。

2.3 相关影响因子的显著性变化特征

研究发现,1980 至 2010 年土壤类型(亚类)对表层 SOCD 的影响一直是极显著的($p < 0.01$) (表 4)。这是由于土壤亚类反映了成土母质、地形、水热条件的差异,不同亚类成土过程不同,SOCD 含量也有显著性差异。土壤质地类型对 1980 年和 2010 年表层 SOCD 的影响均不显著。研究区质地类型主



注: a.1980年表层SOC分布; b.2010年表层SOC分布; c.1980~2010年表层SOC变化; d.1980年剖面SOC分布; e.2010年剖面SOC分布; f.1980~2010年剖面SOC变化 Note: a.The distribution of topsoil SOC in 1980; b.The distribution of topsoil SOC in 2010; c.The change of topsoil SOC from 1980 to 2010; d.The distribution of profile SOC in 1980; e.The distribution of profile SOC in 2010; f.The change of profile SOC from 1980 to 2010

图 2 1980 年和 2010 年表层 SOC 空间分布及 30 年间变化

Fig. 2 Spatial distribution of SOC in 1980 and 2010 and variation of SOC in the past 30 years

表 3 1980 年和 2010 年表层及剖面 SOC、SOCs、SOC 年均变化速率及 SOC 配对 t 检验

Table 3 SOC, SOCS, and mean annual SOC change rate in topsoil and profile soil in 1980 and 2010 and SOC paired t-test

深度 Depth (cm)	SOCD ¹⁾ (t hm ⁻²)		SOCs ²⁾ (t g)		SOC 年均变化速率 Mean annual SOC change rate (t hm ⁻² a ⁻¹)	SOC 配对 t 检验 SOC paired t-test		
	1980	2010	1980	2010		t	df	p (2-tailed)
0~20	67.6	63.6	18.0	16.9	-0.14	7.123	35	0.01
0~100	192.4	188.5	51.2	50.2	-0.13	8.842	35	0.01

1)SOC:土壤有机碳密度 Soil organic carbon density;2)SOCs:土壤有机碳库 Soil organic carbon

要为重壤土,占 85.3%,土壤质地分布较为均一,对 SOC 的空间变异影响较小。

从地形因素来看,海拔因子对应的 p 值从 1980 年的 0.049 增加至 2010 年的 0.666,不同海拔的 SOC 差异由显著转变为不显著。研究区黑土、草甸土和沼泽土样点的平均海拔分别为 241m、212m 和 205m,海拔较高的漫岗高原发育黑土,其水热条件和易开垦程度均优于海拔较低的沟谷及低洼平地发育的草甸土和沼泽土,进而导致开垦年限和

SOC 的差异。而随着开垦年限的进一步增加,施肥、耕作措施、种植制度等农田管理措施对 SOC 的影响越来越大,SOC 下降速率变缓^[25],不同海拔 SOC 水平趋于一致,海拔的影响不再显著。

与海拔相反,坡度因子的 p 值从 1980 年的 0.461 减少至 2010 年的 0.027,坡度对 SOC 的影响从不显著转变为显著,反映了农田开垦后土壤侵蚀的产生和加剧。建国后尤其是 1970 年以后伴随人口的增长以及大型拖拉机等农业机械的使用,研

究区农田被大规模开垦,由于开垦年限较短以及农田主要分布于 $0^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 的缓坡,坡度造成的土壤侵蚀还未对 SOCD 的分布造成显著影响。随着开垦年限的增加,土壤侵蚀增强,坡度对土壤侵蚀影响增加^[26]。由于土壤的侵蚀搬运与沉积,原有 SOC 分布格局被打破,SOCD 在不同坡度上再分布,SOCD 变异程度增强^[27-28]。坡肩较陡,易发生土壤侵蚀,流失的土壤物质包括有机质等在坡脚逐渐累积^[29]。因此,经过 30 年的开垦耕作后,坡度对 SOCD 空间分布的影响显著性增强。而坡向在 2 个时间节点对 SOCD 的影响均不显著,研究区地势虽有所起伏但坡长较长,不同坡向的光照条件无明显差异,削弱了坡向对 SOCD 的影响。

土壤肥力因子中,1980 年和 2010 年 pH 对表层 SOCD 影响均显著($p < 0.05$)。戴万宏等^[30]利用全国第二次土壤普查的 886 个典型地带性土种剖面资料,统计分析发现土壤表层有机质含量和 pH 之间呈极显著的负相关关系($p < 0.01$)。Heinze 等^[31]对长期试验田进行不同的施肥处理,认为土壤 pH 是微生物量及活性和土壤有机质差异的主要驱动

因素。土壤表层中大约 80%~97% 的氮存在于有机质中^[32],土壤全氮与有机质原本就存在显著相关性关系,2 个时间节点均分析得出全氮对 SOCD 的影响极显著($p < 0.01$),验证了土壤全氮与有机质之间显著关系研究结果的可靠性。全磷因子的 p 值从 1980 年的 0.009 增加至 2010 年的 0.404,对 SOCD 的影响由显著转变为不显著。黑土开垦的历史不长,有机质本底水平较高,在全国第二次土壤普查之前人们更多依靠土壤的自然肥力来满足作物生长,土壤磷的主要来源为土壤有机质^[33],不同 SOCD 水平全磷含量差异显著。赵少华等^[34]研究表明东北黑土区的有机质与有机磷及全磷均呈极显著相关($p < 0.01$)。姜勇等^[35]对东北玉米带农田土壤磷素的研究也表明了土壤全磷和有机磷含量与土壤有机碳呈极显著的正相关($p < 0.01$)。1980 年以后,研究区大量施用化肥,尤其是高浓度磷肥的施用导致土壤全磷含量显著上升^[36],土壤全磷的主要来源为磷肥的投入,与 SOCD 关系减弱,全磷因子转变为不显著因子。

表 4 1980 年和 2010 年 SOCD 影响因子方差分析

Table 4 Analysis of variance of the SOCD impact factors in 1980 and 2010

影响因素类型 Type of factors	影响因子 Impact factors	1980 年 Year 1980		2010 年 Year 2010	
		<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
土壤类型 Soil type	亚类 Subgroup	3.090	0.007	9.555	0.001
	质地 Texture	0.287	0.752	0.992	0.406
地形 Topography	海拔 Elevation	2.848	0.049	0.528	0.666
	坡度 Slope degree	0.790	0.461	3.008	0.027
	坡向 Slope aspect	0.646	0.590	0.711	0.551
肥力 Fertility	pH	2.969	0.043	4.043	0.025
	全氮 Total nitrogen	5.888	0.001	4.892	0.005
	全磷 Total phosphorus	4.448	0.009	0.997	0.404

总体来看,1980 年表层 SOCD 的显著性影响因子为土壤亚类、海拔、pH、全磷;2010 年的显著性影响因子为土壤亚类、坡度、pH,海拔和全磷不再显著,坡度成为新的显著性影响因子。

3 结论

克东北安地区沟谷和低洼平地农田开垦年限较短,初始有机碳含量较高,表层和剖面的 SOCD 及下降速率均高于漫岗高平原。从 1980 年至 2010

年,30 年间研究区表层和剖面的 SOCD 年均下降速率分别为 $-0.14 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $-0.13 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,农田土壤有机碳库显著下降。开垦条件下,SOCD 影响因子的显著性水平发生变化,1980 年表层 SOCD 的显著性影响因子为土壤亚类、海拔、pH、全磷,而 2010 年的显著性影响因子为土壤亚类、坡度、pH。30 年间,开垦年限增长和农田管理措施一致性导致各样点 SOCD 下降速率变缓,土壤有机碳趋于平衡,空间变异性减小,SOCD 与海拔关系显著减弱;土壤全磷增加主要来源于肥料投入,与 SOCD 关系也变

得不再显著,土壤侵蚀导致 SOC 在空间上再分布,不同坡度的 SOCD 的变异性增加,坡度成为新的显著性影响因子。明确研究区不同时期土壤碳库及其影响因子的显著性变化特点,对土壤有机碳库演变模拟时选择影响因子以及遏制该区农田有机碳库流失具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Jungclaus J H, Lorenz S J, Timmreck C, et al. Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. *Climate of the Past*, 2010, 6(5): 723—737
- [2] Ajani J I, Keith H, Blakers M, et al. Comprehensive carbon stock and flow accounting: A national framework to support climate change mitigation policy. *Ecological Economics*, 2013, 89: 61—72
- [3] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, 451(7176): 289—292
- [4] Cao M, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185—198
- [5] Schlesinger W H. Carbon storage in the caliche of arid soils: A case study from Arizona. *Soil Science*, 1982, 133(4): 247—255
- [6] Luo Z, Wang E, Sun O J, et al. Modeling long-term soil carbon dynamics and sequestration potential in semi-arid agro-ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1529—1544
- [7] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1658—1670
- [8] Thilde B B, Elberling B, Neergaard A, et al. Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation & Development*, 2013, DOI: 10.1002/ldr.2205
- [9] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 39—47
- [10] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertilizer Research*, 1994, 38(2): 151—163
- [11] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998. National Soil Survey Office. *Soils of China* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [12] 王建国, 刘鸿翔, 孟凯. 松嫩平原农业生态系统持续发展的管理对策. 北京: 测绘出版社, 1997: 92—98. Wang J G, Liu H X, Meng K. Management strategies on sustainable development of agriculture economy system in Songnen Plain (In Chinese). Beijing: Mapping Press, 1997: 92—98
- [13] Yu Y, Guo Z, Wu H, et al. Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from 1980 to 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2021, doi: 10.1029/2008GB003428
- [14] Liu D, Wang Z, Zhang B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1): 73—81
- [15] Wang D D, Shi X Z, Wang H J, et al. Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of Northeast China. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 525—535
- [16] Zhang S, Zhang X, Huffman T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(3): 427—438
- [17] Wang Z M, Zhang B, Song K S, et al. Spatial variability of soil organic carbon under maize monoculture in the Song-Nen Plain, Northeast China. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 80—89
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil physical and chemical analysis* (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [19] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2279—2283. Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon and density based on 1:1 000 000 soil database (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279—2283
- [20] 倪元龙, 于东升, 张黎明, 等. 土壤碳库研究中土壤数据从矢量到栅格的等精度转换. *地理研究*, 2012, 31(6): 980—986. Ni Y L, Yu D S, Zhang L M, et al. Study on the transformation from vector to raster for soil data with identical data precision in the estimation of soil organic carbon stocks (In Chinese). *Geographical Research*, 2012, 31(6): 980—986
- [21] Dlugos V, Fiener P, Schneider K. Layer-specific analysis and spatial prediction of soil organic carbon using terrain attributes and erosion modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 922—935
- [22] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: Spatial variations and controlling factors. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1380—1393
- [23] Zhang K, Dang H, Tan S, et al. Change in soil organic carbon following the 'Grain-for-Green' programme in China. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(1): 13—23
- [24] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 298—300. Sun W X, Shi X Z, Yu D S, et al. Estimation of soil organic carbon density and storage of Northeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 298—300
- [25] Minasny B, Sulaeman Y, Mcbratney A B. Is soil carbon disappearing? The dynamics of soil organic carbon in Java. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1917—1924
- [26] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 736—746

- [27] 唐国勇, 黄道友, 黄敏, 等. 红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子. 土壤学报, 2010, 47(4): 753—759. Tang G Y, Huang D Y, Huang M, et al. Spatial variations of organic carbon in surface soils in a hilly landscape of the red-earth region and their affecting factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 753—759
- [28] Li F, Zhang J, Su Z, et al. Simulation and ^{137}Cs tracer show tillage erosion translocating soil organic carbon, phosphorus, and potassium. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, 176(5): 647—654
- [29] Wei J, Xiao D, Zhang X, et al. Topography and land use effects on the spatial variation of soil organic carbon: A case study in a typical small watershed of the black soil region in Northeast China. Eurasian Soil Science, 2008, 41(1): 39—47
- [30] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. 土壤学报, 2009, 46(5): 851—859. Dai W H, Huang Y, Wu L, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in topsoil of zonal soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 851—859
- [31] Heinze S, Raupp J, Joergensen R G. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture. Plant and Soil, 2010, 328(1/2): 203—215
- [32] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1978: 382—383. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978: 382—383
- [33] Dalal R C. Soil organic phosphorus. Advances in Agronomy, 1977, 29: 83—117
- [34] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 东北黑土土壤磷的纬向分异. 农业工程学报, 2005, 21(4): 34—37. Zhao S H, Yu W T, Zhang L, et al. Latitudinal differentiation of phosphorus in black soil in Northeast of China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2005, 21(4): 34—37
- [35] 姜勇, 庄秋丽, 张玉革, 等. 东北玉米带农田土壤磷素分布特征. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1931—1936. Jiang Y, Zhuang Q L, Zhang Y G, et al. Distribution characteristics of soil phosphorus in maize belt farmlands of Northeast China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 1931—1936
- [36] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累, 形态转化及其有效性影响的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143—147. Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 143—147

SOIL CARBON STOCKS AND CHANGES IN SIGNIFICANCE OF ITS IMPACT FACTORS IN TYPICAL BLACK SOIL REGION OF NORTHEAST CHINA

Wang Chong^{1,2} Yu Dongsheng^{1,2†} Zhang Haidong^{1,2} Zhao Yongcun^{1,2} Shi Xuezheng^{1,2} Wang Ning¹

(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 It is important for the study on soil carbon sequestration to figure out soil carbon pools and their significant influencing factors in different periods. Based on the data of the second National Soil Survey of Bei'an and Kedong area in the early 1980's, the data of the soil testing for fertilizer recommendation in 2010, and the data of the analysis of actual supplementary soil samples, soil organic carbon pool and spatio-temporal variation of its density was studied using the soil type-GIS correlation method, meanwhile, impact factors of the spatial variation of soil organic carbon density and variation of their significances in the different periods. Results show that the soil organic carbon density and its decreasing rate in the farmlands in valleys and low-lying plains is higher than that in rolling hill high plains in the study region and the carbon pool in the surface soil layer and the profile decreased at an annual average rate of $-0.14 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $-0.13 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. The soil carbon stock showed an apparent declining trend. In 1980, soil type (subtype), elevation, pH, and total phosphorus were found to be the main impact factor of the soil organic carbon density in the surface soil layer of the farmlands, while in 2010, soil type (subtype) and soil pH remained, but slope degree replaced elevation and total P as major impact factors.

Key words Typical black soil area; Soil organic carbon pool; Soil organic carbon density; Significance of impact factors

(责任编辑: 檀满枝)