DOI: 10.5846/stxb201908231756

翟国庆,韩明钊,李永江,王恩姮.黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析.生态学报,2020,40(16):5751-5760. Zhai G Q, Han M Z, Li Y J, Wang E H.Organic carbon change and carbon sequestration potential of sloping farmland in the black soil area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16):5751-5760.

黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析

翟国庆,韩明钊,李永江,王恩姮*

东北林业大学林学院,哈尔滨 150040

摘要:东北黑土区自开垦以来有机质含量逐渐降低,有机碳库长期处于亏缺状态,理论上也具有较大的固碳潜力。以典型黑土 区长期传统作业的坡耕地(30—60 a)为研究对象,通过测定不同坡位(坡上侵蚀区和坡下沉积区)、不同土层(表土和底土)有 机碳分布特征,估算不同开垦年限黑土固碳潜力及其恢复至固碳潜力所需的时间。结果表明:(1)总有机碳、有机碳密度以及 碳饱和水平均表现为沉积区显著大于侵蚀区,表土显著大于底土,且均在开垦 30a 坡耕地达到最大值;(2)固碳潜力表现为侵蚀 区(1.24—2.89 kg/m²)显著大于沉积区(0.79—1.04 kg/m²),底土(0.83—3.59 kg/m²)显著大于表土(0.6—2.53 kg/m²),随着开 垦年限的增加表现为开垦 30 a 显著小于开垦 40 a、60 a;(3)黑土坡耕地(30—60 a)侵蚀区和沉积区土壤(0—50 cm)达到固碳 潜力分别需要 20—181 a 和 13—66 a。黑土坡耕地固碳潜力的时空变异性在农业经营以及修复管理过程中需引起重视,以实现 黑土资源的可持续利用。

关键词:开垦年限;表土和底土;侵蚀-沉积区;有机碳密度;固碳时间

Organic carbon change and carbon sequestration potential of sloping farmland in the black soil area

ZHAI Guoqing, HAN Mingzhao, LI Yongjiang, WANG Enheng* College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Soil organic matter has gradually decreased since the original reclamation of black soil in Northeast China, and the organic carbon pool has maintained a deficient state for an extended period, which in theory leads to a greater carbon sequestration potential. Based on sloping farmlands (30-60 a) in a typical black soil area, the organic carbon distribution characteristics of different soil layers (topsoil and subsoil) at different slope positions (upper-slope eroded area and lower-slope deposit area) were investigated. Besides, the sequestration potential of organic carbon on sloping farmlands with different reclamation years and duration to meet the carbon sequestration potential were estimated. The results showed that: (1) the total organic carbon, the organic carbon density, and the carbon saturation level in lower-slope deposition areas and in the topsoil layer were significantly greater than those in upper-slope eroded areas and subsoil layer, respectively. All their maximum values were found to occur on sloping farmland with 30 years of reclamation. (2) The carbon sequestration potential of lower-slope deposition areas $(1.24-2.89 \text{ kg/m}^2)$ and topsoil $(0.6-2.53 \text{ kg/m}^2)$, respectively. The potential of carbon sequestration was significantly lower in farmland with 30 years of reclamation than that in farmlands with 40 years and 60 years of reclamation. (3) It will take 20-181 a and 13-66 a to achieve carbon sequestration potential in upper-slope eroded areas and lower-slope deposition areas of sloping farmland (30-60 a) in black soil (0-50 cm),

收稿日期:2019-08-23; 网络出版日期:2020-06-08

基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(201404202)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: erxin222@163.com

respectively. Therefore, more attention should be paid to the spatial-temporal variability of carbon sequestration potential on sloping farmland in the process of agricultural operation and restoration management, to realize the sustainable potential of black soil resources.

Key Words: reclamation years; topsoil and subsoil; erosion-deposition area; organic carbon density; carbon sequestration duration

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)封存在粮食安全和气候变化方面发挥关键作用^[1]。21 届巴黎联 合国气候大会上提出"千分之四"倡议(https://www.4p1000.org/understand),即每年每公顷土壤固碳 0.4—0.6 t可抵消当年全球温室气体(Global Greenhouse Gas, GHG)的排放^[2-3],而全球平均固碳水平仅为 0.24 t hm⁻² a^{-1[2]},仍具有较大的固碳潜力。改善农业管理措施、恢复退化农田是封存有机碳的有效途径之一,不仅可以 抵消大气中温室气体的排放,还能提升土地生产力、实现农业可持续发展^[4-5]。但在长期耕作的坡地上,由于 自然因素(地形、降水)和人为因素(耕作)使得土壤发生侵蚀-沉积作用,进而导致 SOC 在坡面尺度重新分 布^[6-7],为农田坡面碳封存的估算带来不确定性。一般情况下,土壤侵蚀导致坡上侵蚀区 SOC 大量流失,而坡 下沉积区累积增加^[8],所以,侵蚀区土壤具有较大的固碳潜力^[9],而沉积区土壤固碳固潜力则相对有限^[10]。 与此同时,因侵蚀-沉积作用而导致的不同土层碳储量差异对固碳潜力的估算也具有重要贡献^[3,11]。

缓解气候变化需要考虑 SOC 的长效稳定机制,因此,细颗粒矿物组分(<20 μm,粉粒和黏粒)作为土壤碳 稳定潜力的代表已得到广泛的应用^[3]。细颗粒矿物对有机碳的吸持限度被称为土壤碳保护的最大容量或者 碳饱和度,即理论碳饱和容量^[12],而理论碳饱和容量与细颗粒有机碳的实际含量的差异被定义为碳饱和不 足^[13],即土壤固碳潜力^[10]。土壤固碳潜力不仅受到当前矿物组分及有机碳含量的影响,还会受土地利用类 型、土壤母质、土壤质地、气候的影响^[14]。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,同时也是四大水蚀区之一。腐殖质层厚度已从垦前 60—70 cm 降至 20—30 cm^[15],农田有机碳密度持续下降,有机碳库长期处于亏缺状态^[16]。黑土区因耕作而导致侵蚀退化的土壤具有较大的固碳潜力^[17],理论上,侵蚀区相对沉积区以及非耕层相对耕层具有更大的固碳潜力。本研究以典型黑土区长期传统作业的坡耕地(30—60 a)为研究对象,探讨坡上侵蚀区和坡下沉积区有机碳分布特征,并估计不同开垦年限侵蚀区和沉积区土壤固碳潜力的差异,旨为评估农田黑土固碳潜力及退化黑土修复提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于黑龙江省西北部的克山农场(48°12′—48°23′N、125°08′—125°37′E),海拔 240—340 m,温 带大陆性季风气候,年均气温 0.9℃,年均降水量 501.7 mm,年均蒸发量 1329 mm,土壤以黏化湿润均腐土(中 国土壤分类系统)为主,属于典型黑土区,坡缓而长,具有明显的漫川漫岗地形特征。该区已全面实现机械作 业,铧式犁深翻配合圆盘靶整平是最常用的整地管理措施,多年平均整地深度(耕层)约为 30 cm。

1.2 样地选取与样品采集

2018年10月下旬(整地前),于26连队选择开垦年限为30a(48°17′9″N、125°25′51″E)、40a(48°17′2″N、125°26′15″E)坡耕地,20连队选择开垦年限60a(48°15′23″N、125°20′1″E)坡耕地为研究对象(图1),3个样地自开垦以来均为玉米和大豆轮作,且采样时前茬作物均为青贮玉米,能够作为该区长期机械作业坡耕地代表。由于长期耕作迁移以及水蚀共同作用,坡上形成净迁移侵蚀区,而在坡下形成净迁入沉积区^[7]。为对比侵蚀区和沉积区土壤有机碳及固碳潜力的差异,分别在30a,40a和60a坡耕地的坡上(约距坡顶端10、20、40m)和坡下(近坡底端)2个位置各设1处采样点,挖掘土壤剖面(长、宽、深分别为1、0.5、1m),总计6个土

壤剖面,使用分层抽样方法在每个剖面分 5 层取样(0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm),每层土壤样 品均匀混合记为一个样本,共获取 30 个样本,然后将土壤样品在通风透气处自然风干后,过 2 mm 筛,备用。 需要说明的是,坡上侵蚀区排水良好,开垦 30 a 坡耕地的黑土层厚度约为 40 cm,开垦 40 a 和 60 a 坡耕地黑 土层厚度约为 30 cm;坡下沉积区黑土层厚度约为 50—60 cm,70 cm 以下均处于长期浸水状态,且本研究并未 采样到真正的埋藏层(60—80 cm),因此,沉积区 0—50 cm 数据仅代表沉积区表层土壤。各层各指标重复 3 次。样地及土壤基本性质见表 1。



1.3 样品处理与分析

将 10g风干土壤(<2 mm)置于 500 mL 三角瓶中,并加入 0.5 moL/L NaOH 10 mL,再加入蒸馏水使体积达 到 250 mL 左右,充分摇匀后,置于电热板加热,微沸 1 h 后转移土壤悬浮液至 1 L 量筒,根据司笃克斯定 律^[18],在相应深度和时间虹吸悬浮液,收集黏粒+粉粒(<20 μm)和黏粒(<2 μm)组分,在 105℃下烘干后,采 用元素分析仪 vario TOC(Elementer,德国)测定 SOC 含量,所有的土壤样品都不含碳酸盐^[7],所以 SOC 含量即 为总碳。

1.4 指标计算

1.4.1 有机碳密度(*C_p*)^[19]

$$C_p = C_T \times BD \times (1 - RF) \times T \times 10^{-2} \tag{1}$$

式中, C_{D} :有机碳密度(kg/m²); C_{T} :总有机碳含量(g/kg); BD:体积密度(g/cm³); RF:>2 mm 石砾含量(%),由于该区域为平原区域,大于 2 mm 的砾石含量可以忽略不计^[20]; T是土层厚度(cm)。

Table 1 Basic properties of field site and soil samples									
开垦年限 Tillage years/a	坡度 Slope gradient/°	坡长 Slope length/m	坡位 Slope position	土层深 Soil depth /cm	土壤容重 Soil density/ (g/cm ³)	土壤含水量 Soil moisture/%	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
30	6.7	68	ES	10	$1.17 \pm 0.06 Bc$	33.42±0.79Ba	34.05±4.54Aa	36.32±4.54Aa	29.63±9.09Aa
				20	$1.12 \pm 0.05 \mathrm{Ab}$	33.69±0.64Ba	32.25±6.87Aa	34.50±6.87Aa	33.26±13.75Aa
				30	$1.07{\pm}0.04{\rm Ab}$	33.44±0.3Ba	33.30±7.69Aa	35.52±7.69Aa	31.19±15.38Aa
				40	1.14±0.01Aab	$29.71{\pm}1.04\mathrm{Bb}$	39.35±6.8Aa	41.57±6.81Aa	19.08±13.61Ba
				50	1.22±0.02Aa	28.95±1.07Ba	34.59±5.1Aa	36.80±5.1Aa	28.63±10.2Aa
			DS	10	$0.95 \pm 0.04 \mathrm{Aab}$	$41.34 \pm 0.21 \mathrm{Ab}$	$26.82{\pm}2.66{\rm Ab}$	$29.12{\pm}2.65\mathrm{Ab}$	44.06±5.31Aa
				20	$1.13{\pm}0.02{\rm Abc}$	38.91±1Ac	35.66±2.52Aa	37.84±2.52Aa	$26.49{\pm}5.04{\rm Ab}$
				30	$1.09{\pm}0.02{\rm Ac}$	44.24±1.09Aa	33.44±0Aa	35.67±0Aab	30.88±0Aab
				40	$1.18{\pm}0.03{\rm Ab}$	43.88±0.45Aa	31.16±2.51Ba	33.33±2.51Bab	35.51±5.02Aab
				50	1.19±0.03Aa	44.33±0.77Aa	29.21±0Aa	31.46±0Aab	39.33±0Aab
40	4.8	121	ES	10	1.07±0.09Aab	30.46±1.97Ba	33.44±0Ab	$35.67 \pm 0 \mathrm{Ab}$	30.88±0Aa
				20	1.20±0.09Aa	30.16±0.61Ba	$36.46 \pm 2.58 \text{Aab}$	38.69±2.58Aab	24.85±5.15Bab
				30	1.35±0.1Aab	$28.34{\pm}2.83{\rm Bab}$	43.66±2.56Aa	45.88±2.56Aa	10.47 ± 5.13 Bb
				40	1.37 ± 0.04 Bab	$25.55{\pm}1.65\mathrm{Bb}$	$37.53 \pm 4.42 \text{Aab}$	39.74±4.42Aab	22.74±8.83Aab
				50	$1.18{\pm}0.24{\rm Ab}$	$27.04{\pm}0.59\mathrm{Bb}$	$34.43 \pm 6.72 \mathrm{Ab}$	$36.63{\pm}6.72{\rm Ab}$	28.94±13.43Aa
			DS	10	$1.28 \pm 0.05 Bb$	37.23±1.33Aa	37.32±4.39Aa	39.52±4.39Aa	$23.16{\pm}8.78\mathrm{Ab}$
				20	1.33±0.02Aab	$36.33{\pm}0.61\rm{Ab}$	$27.22{\pm}2.81\mathrm{Bb}$	$29.40{\pm}2.81\mathrm{Bb}$	43.38±5.61Aa
				30	1.26±0.01Aab	38.32±0.49Ab	35.45±2.61Bab	37.71±2.61Bab	$26.84{\pm}5.23\mathrm{Ab}$
				40	1.17±0.02Aa	41.52±0.55Aa	31.53±6.72Aab	33.73±6.72Aab	34.72±13.44Aab
				50	$1.11 \pm 0.15 \mathrm{Ab}$	41.51±2Aa	$28.86{\pm}4.44{\rm Ab}$	$31.08 \pm 4.44 \mathrm{Ab}$	$40.07{\pm}8.88\mathrm{Aab}$
60	3.6	200	ES	10	$1.08{\pm}0.04{\rm Ab}$	33.24±1.2Bab	37.04±4.36Aab	39.22±4.36Aab	23.75±8.72Aa
				20	1.13±0.16Aab	33.29 ± 0.94 Aab	$33.98{\pm}6.62\mathrm{Ab}$	$36.15{\pm}6.62\mathrm{Ab}$	29.86±13.25Aa
				30	1.31±0.12Aa	33.99±3.3Ba	$35.43{\pm}6.63{\rm Ab}$	$37.60{\pm}6.63{\rm Ab}$	26.97±13.25Aa
				40	1.35±0.05Aa	$31.63{\pm}1.41\mathrm{Bb}$	44.25±2.51Aa	46.43±2.51Aa	$9.32 \pm 5.03 \mathrm{Ab}$
				50	1.30±0.09Aab	$30.20{\pm}1.47\mathrm{Bb}$	36.92±4.35Aab	39.09±4.35Aab	24.00±8.69Aa
			DS	10	1.25±0.03Aa	41.16±1.27Aa	35.90±2.54Aa	38.09±2.54Aa	26.01±5.08Aa
				20	1.16±0.34Aa	$35.06{\pm}0.04{\rm Ac}$	37.08±4.36Aa	39.26±4.36Aa	23.66±8.73Aa
				30	1.33±0.01Aa	$36.86{\pm}0.38{\rm Abc}$	35.51±5.02Aa	37.68±5.02Aa	26.81±10.04Aa
				40	1.32±0.01Aa	37.65±1.03Ab	37.24±4.38Aa	39.43±4.38Aa	23.33±8.76Aa
				50	1.37±0.04Aa	35.42±1.78Ac	36.64±4.31Aa	38.79±4.31Aa	24.57±8.62Aa

表1 样地及土壤的基本特性

ES:侵蚀区 Erosion site;DS:沉积区 Deposition site;不同大写字母(A、B)表示相同土层深度侵蚀区和沉积区之间差异显著,不同小写字母(a、b、c)表示侵蚀区或 沉积区不同土层深度之间差异显著(P<0.05)

1.4.2 碳饱和水平(C_{sL})^[3]

$$C_{SL} = \frac{C_{\text{fine}}}{C_{\text{sat}}} \times 100 \tag{2}$$

$$C_{\rm sat} = 0.45 \times M_{\rm fine} \tag{3}$$

式中, C_{st} :碳饱和水平(%); C_{fine} :细颗粒有机碳含量(g/kg); C_{sat} :碳饱和度(g/kg), 模型系数考虑了土壤矿物 类型和土地利用类型以及气候因素的影响, 详细情况可参考 Feng 等人^[21]的研究结果; M_{fine} :<20 µm 细颗粒 的质量含量(%)。

1.4.3 固碳潜力(C_{seq})^[3]

$$C_{\text{seq}} = C_{sd} \times BD \times (1 - RF) \times T \times 10^{-2}$$
(4)

$$C_{sd} = C_{sat} - C_{fine} \tag{5}$$

http://www.ecologica.cn

式中, C_{seq} :固碳潜力(kg/m²); BD_{RF} ,T 同(1)式; C_{sd} :碳饱和度不足(g/kg); C_{fine} 和 C_{sat} 同(2)和(3)式。 **1.4.4** 固碳时间(C_{fine})^[22]

$$C_{\rm time} = \frac{C_{\rm seq}}{C_{\rm rate}} \tag{6}$$

式中, C_{time} :固碳时间(a); C_{seq} 同(4)式; C_{rate} :固碳速率(t hm⁻² a⁻¹); 1 t hm⁻² a⁻¹=0.1 kg m⁻² a⁻¹。

1.5 数据分析

根据该区机械耕作深度 30 cm,将 0—50 cm 土层划分为耕层土壤(0—30 cm)和非耕层土壤(30—50 cm) 分别作为表土和底土进行对比;其中,0—10,10—20,20—30 cm 各土层数据算数平均值作为表土(0—30 cm) 结果;30—40 cm,40—50 cm 各土层数据算数平均值作为底土(30—50 cm)结果。侵蚀区与沉积区之间、表土 和底土之间采用 T 检验进行差异分析(P<0.05);不同开垦年限之间采用单因素方差分析(ANOVA)和图基 (Turkey)进行差异分析(P<0.05);侵蚀-沉积、表土-底土以及开垦年限三个因素之间采用多因素差异分析;分 别使用 SPSS 23 和 Origin 2017 进行统计分析和绘图。

2 研究结果

2.1 土壤固碳潜力估算方法的选择

估算农田土壤固碳潜力常用本底值法和模型法。本底值法是指在研究区首先确定未经干扰的原生系统 或经营管理后已达最优状态的系统土壤有机碳库储量(本底碳库),然后将预估算系统实际的土壤有机碳库 储量与之相比较,二者差值即为固碳潜力^[23-24]。然而有机碳库依据周转时间不同,既有不稳定有机碳库(如 大颗粒有机碳,周转时间数天或者数月),也有相对稳定的有机碳库(如细颗粒有机碳,周转时间几年或数十 年,甚至百年^[25]),很难判断原生或最优系统土壤有机碳库是否已经达到稳定状态或者碳饱和状态。模型法 是假设土壤有机碳随着外源有机碳的输入而线性增加,碳累积不受限制且碳分解速率保持不变^[26]。然而,因 为土壤矿物颗粒有限的表面积致使其对有机碳的吸持能力具有最大限度^[27]。土壤碳饱和度表明,随着碳输 入的增加,有机碳储量将达到最大值,且有机碳累积速率将在此过程中降低^[12],因此,不考虑有机碳饱和度, 模型法估算土壤固碳潜力也可能产生较大不确定性。Feng等人^[21]综合考虑土壤碳饱和度,使用细颗粒(<20 μm)最大有机碳浓度作为基础,通过边界分析法实现了土壤固碳潜力的有效估算。鉴于黑土黏粒含量较高 (30%—45%),研究对象均为长期作业的坡耕地,且缓解气候变化侧重于有机碳的长期稳定机制,所以本文采 用了 Feng 等人^[21]构建的模型方法估算土壤固碳潜力。

2.2 土壤有机碳与固碳潜力分布特征

土壤侵蚀-沉积作用显著影响有机碳及固碳潜力相关指标的空间分布。土壤总有机碳、有机碳密度以及 土壤碳饱和水平均表现为沉积区显著大于侵蚀区(P<0.05),且侵蚀-沉积区的差异均表现为开垦 40 a、60 a 坡 耕地明显大于开垦 30 a;固碳潜力整体上表现为侵蚀区显著小大于沉积区(P<0.05),侵蚀-沉积区的差异仍表 现为开垦 40 a、60 a 坡耕地明显大于开垦 30 a(图 2)。在不同土壤深度水平上,各指标均在表土(0—30 cm) 与底土(30—50 cm)之间表现出显著差异,且侵蚀区的差异明显大于沉积区。土壤总有机碳、有机碳密度以 及土壤碳饱和水平均表现为表土显著大于底土(P<0.05);固碳潜力则表现为底土显著大于表土(P<0.05) (图 2)。

随着开垦年限的增加,土壤总有机碳、有机碳密度以及土壤碳饱和水平在侵蚀区(0—50 cm)均表现为开 垦 30 a 坡耕地显著大于开垦 40 a、60 a,而沉积区(0—50 cm)有机碳密度则规律相反(P<0.05),且土壤有机 碳、碳饱和水平没有显著差异。其中开垦 30a 坡耕地侵蚀区有机碳密度和碳饱和水平分别达到最大值 3.35 kg/m²和 67%。固碳潜力在侵蚀区表现为开垦 30a 坡耕地显著小于开垦 40 a、60 a,且达到最小值 1.24 kg/m², 而沉积区开垦 60 a 坡耕地固碳潜力显著大于开垦 30 a、40 a(P<0.05),且达到最大值 1.04 kg/m²(图 2)。

2.3 土壤有机碳以及固碳潜力的影响因素

一般线性模型实验结果表明,侵蚀-沉积、表土-底土以及侵蚀-沉积与开垦年限的交互作用、表土-底土与





Fig.2 Variation of total soil organic carbon, organic carbon density, carbon saturation level and soil carbon storage potential 不同大写字母(A、B)表示侵蚀区和沉积区的差异显著,不同小写字母(a、b)表示表土和底土的差异显著,不同小写字母(x、y、z)表示坡耕地 不同开垦年限(30 a、40 a、60 a)之间全土的差异显著(P< 0.05);图中数据为平均值±标准差(n=3)

开垦年限的交互作用均对总有机碳、有机碳密度、碳饱和水平、固碳潜力这4个指标有显著影响(P<0.05);而 开垦年限、侵蚀-沉积与表土-底土与开垦年限三者交互作用均对上述4个指标无显著影响。另外,侵蚀-沉积 与表土-底土的交互作用对总有机碳、碳饱和水平以及固碳潜力均有显著影响,而对有机碳密度没有显著影响 (表2)。

土壤侵蚀-沉积作用以及长期耕作扰动均显著影响土壤有机碳变化以及固碳潜力大小。其中,侵蚀-沉积 区土壤碳固存相关指标均有显著差异,侵蚀区总有机碳、有机碳密度以及碳饱和水平均显著小于沉积区,而固 碳潜力均显著大于沉积区(P<0.05)。表土总有机碳、有机碳密度以及碳饱和水平均显著大于底土;而固碳潜 力则表现为底土大于表土。随着开垦年限的增加,总有机碳和碳饱和水平表现为开垦 40 a、60 a 坡耕地显著 小于开垦 30 a,有机碳密度表现为先降低后增加的规律,且开垦 30 a 坡耕地达到最大值,固碳潜力表现为开 垦 30 a 显著小于开垦 40 a、60 a(表 3)。

表2 侵蚀-沉积、表土-底土、开垦年限及其交互作用对固碳潜力相关指标的影响(P值)

 Table 2
 Significance of erosion-deposition, topsoil-subsoil and reclamation years and their interaction on the related indicators of carbon storage potential (P value)

指标 Index	总有机碳 TOC Total organic carbon / (g/kg)	有机碳密度 C _D Organic carbon density / (kg/m ²)	碳饱和水平 C _{sL} Carbon saturation level /%	固碳潜力 C _{seq} Carbon sequestration potential /(kg/m ²)
侵蚀-沉积作用 Erosion-deposition effect	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
表土-底土作用 Topsoil-subsoil effect	0.003	0.013	0.003	0.007
不同开垦年限作用 Effect of different reclamation years	0.265	0.833	0.265	0.093
侵蚀-沉积与表土-底土的交互作用 Interaction of erosion-deposition and topsoil-subsoil	0.002	0.078	0.002	0.006
侵蚀-沉积与开垦年限的交互作用 Interaction between erosion-deposition and reclamation years	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
表土-底土和开垦年限的交互作用 Interaction between topsoil and subsoil and reclamation years	<0.001	0.048	< 0.001	<0.001
侵蚀-沉积与表土-底土以及开垦年限三者之 间的交互作用 Interaction between erosion-deposition, topsoil-subsoil and reclamation years	0.297	0.341	0.246	0.527

表 3 侵蚀-沉积、表土-底土、开垦年限对固碳潜力的总体影响

Table 3 General effects of erosion-deposition, topsoil-subsoil and reclamation years on carbon storage potential related indexes							
北存	总有机碳 TOC	有机碳密度 C _D	碳饱和水平 C _{SL}	固碳潜力 C_{seq}			
1日(小) Index	Total organic carbon/	Organic carbon	Carbon saturation	Carbon sequestration			
mdex	(g/kg)	density /($kg\!/m^2$)	level /%	potential /(kg/m^2)			
侵蚀区 Erosion site	21.26±0.51B	$2.48 \pm 0.02 B$	$47.25 \pm 1.18B$	$2.27 \pm 0.03 A$			
沉积区 Deposition site	$34.46 \pm 0.15 \text{A}$	$4.16 \pm 0.08 A$	$76.58 \pm 0.37 \text{A}$	$0.90 \pm 0.02 B$			
表土 Topsoil	32.35±0.4A	3.77±0.1A	$71.89 \pm 0.95 A$	1.13±0.02B			
底土 Subsoil	23.37±0.25B	$2.86 \pm 0.06 B$	51.93±0.59B	2.03±0.02A			
开垦年限 30a Reclamation period of 30 years	31.97±0.28A	3.54±0.07A	71.04±0.89A	$1.05 \pm 0.01 \mathrm{B}$			
开垦年限 40a Reclamation period of 40 years	25.04±0.47B	$3.05 \pm 0.06B$	55.65±1.05B	$1.84 \pm 0.04 A$			
开垦年限 60a Reclamation period of 60 years	26.57±1.0B	3.36±0.16A	59.05±2.03B	1.85±0.03A			

不同大写字母(A、B、C)表示各个指标内部之间的差异显著(P< 0.05)

2.4 土壤固碳时间估算

通过有机肥施加、秸秆还田、免耕等管理可逐渐增加 SOC 含量,平均固碳速率在 0.16—0.62 t hm⁻² a⁻¹范 围内^[28-29]。基于此固碳速率,估计了不同开垦年限黑土坡耕地达到固碳潜力的时间(表 4)。开垦 30 a、40 a、 60 a 坡耕地农田达到固碳潜力分别需要 17—66 a、30—115 a、30—116 a;侵蚀区土壤达到固碳潜力需要 20— 181 a,沉积区土壤达到固碳潜力需要 13—66 a。

3 讨论

3.1 侵蚀-沉积区土壤固碳潜力差异

黑土区坡耕地在水蚀和耕作共同作用加重了水土流失^[7],由于耕地边界的存在,坡上表现为净迁出,上 坡土壤迁移至坡下表现为净迁入,最终形成坡上侵蚀-坡下沉积的空间分布格局^[30]。土壤有机碳含量伴随坡 耕地土壤迁移也呈现相似的空间分布特征,沉积区总有机碳、有机碳密度以及碳饱和水平显著大于侵蚀区;且 开垦 40 a、60 a 坡耕地侵蚀-沉积区的差异明显大于开垦 30 a(图 2),长期耕作使得坡耕地坡上区域土壤侵蚀 加剧,大量有机碳流失,有的地方甚至出现破皮黄现象[15],而坡下区域大量有机碳伴随土壤迁入-沉积埋 藏^[8]。沉积区较高的土壤含水量抑制了土壤呼吸^[31],有机碳矿化减少;同时,SOC的矿化分解具有较强的温 度敏感性[32],沉积区较高的土壤含水量还可以降低和缓冲土壤温度的变化,从而影响微生物活性;除此之外, 优先迁移的细颗粒矿物在沉积区积聚,其巨大的表面积以及强烈的吸附能力与土壤有机碳结合形成有机矿物 复合物,增加了沉积区土壤颗粒的团聚作用,促进了土壤有机碳的长期稳定[33]。侵蚀-沉积区有机碳浓度的 变化最终决定了固碳潜力的差异,侵蚀区由于遭受严重的土壤侵蚀而远离碳饱和状态(33.14%-67.15%),而 沉积区大量有机碳积累,使得碳饱和水平明显提高(74.13%—80.7%),侵蚀区的固碳潜力最大为 2.89 kg/m², 而沉积区的固碳潜力最大为 1.04 kg/m²(图 2),这与 Lal 等^[9]和 Wiesmeier 等^[10]的研究结果一致,即有机碳耗 竭的土壤(碳饱和水平低)往往具有较大的固碳潜力,而高有机碳含量(碳饱和水平高)的土壤固碳潜力相对 有限。

The duration required for sloping farmlands in black soil area to reach its carbon sequestration potential Table 4 30 a 40 a 60 a 指标 Index ES \mathbf{ES} DS DS ES DS 固碳速率/(thm⁻²a⁻¹) 0.16-0.62 Carbon sequestration rate $C_{\rm rate}$ 固碳潜力/(kg m⁻² a⁻¹) 1.25 0.86 2.90 0.78 1.05 2.67 Carbon sequestration potential C_{seq} 固碳时间/a 20 - 7814-54 47-181 13-49 43-167 17-66 Carbon sequestration time C_{time}

表 4 不同开垦年限黑土坡耕地达到固碳潜力所需的时间

3.2 表土和底土固碳潜力差异

多数研究对于固碳潜力的估算仅限于表层(0-30 cm)土壤^[13,16-17],而对于表层以下土壤固碳潜力估算 较少。由于表层土壤的总有机碳、有机碳密度以及碳饱和水平显著大于底土(P<0.05),所以表土固碳潜力 (0.6—2.53 kg/m²)显著小于底土(0.83—3.59 kg/m²)(P<0.05)(图 2)。底土较高的固碳潜力可能是由于碳 输入较低,并且主要来自表土的易位[34]使得土壤远离碳饱和状态[35];另外,由于底土相对于表土受到较少耕 作扰动,土壤有机碳的物理稳定机制能够促进有机碳长期保存[36]。底土具有较大的固碳潜力也得到了不同 研究地区的证实,例如,徐嘉晖等人^[19]对大兴安岭森林土壤固碳潜力估算表明 B 层土壤固碳潜力达到了 6.06 kg/m²; Chen 等人^[3]估计法国表土和底土分别可以固碳 1008 Tg 和 1360 Tg; 巴西免耕土壤 0—100 cm 深度的 固碳潜力比 0—30 cm 深度高约 59%^[11],这有效指示深层土壤储存碳的重要性,底土对于固碳潜力的贡献不 可忽视。种植具有深生根形状的农作物[37]或者深耕土壤[38]可提高底土有机碳含量和储量[39],但也有研究 指出通过这种方式增加的有机碳可能并不稳定,因为大多数底土碳来源于表土新鲜的有机质(溶解有机碳, Dissolved Organic Carbon, DOC)^[40-41]。由此看来,尽管底土具有较大的碳固存潜力,但在未来实施碳固存策 略时需充分考虑有机碳的长效机制。

3.3 不同开垦年限坡耕地土壤固碳潜力差异

长期耕作加剧了土壤侵蚀过程,使得土壤有机碳含量迅速下降,之前有研究指出,黑土开垦 10 a,20—30 a 和 50 a,有机碳含量从 120 g/kg 降至 70 g/kg,40—50 g/kg 和 30—40 g/kg^[42],而本文的研究发现随着开垦 年限的延长,有机碳含量降低速度更快,开垦 30 a 坡耕地 SOC 含量(31.97 g/kg)大于开垦 40 a(25.04 g/kg) 和开垦 60 a(26.57 g/kg)(表3),由此看来长期耕作确实是加剧黑土有机碳损耗的主要原因,但是,可能通过 与土壤侵蚀共同作用而致。因为开垦年限对有机碳含量以及固碳潜力没有显著影响,而侵蚀-沉积与开垦年 限的耦合作用、表土-底土与开垦年限的耦合作用均显著影响有机碳含量以及固碳潜力(表2),这说明长期耕

5759

作通过加快土壤侵蚀-沉积水平迁移过程以及耕作垂直扰动过程可显著影响坡耕地土壤有机碳以及固碳潜力 的空间分布。因此,不同开垦年限坡耕地达到固碳潜力的时间也有所差异(表4)。

3.4 坡耕地土壤固碳时间差异分析

为了实现土地生产力的可持续,许多改善农田管理的保护性措施(如有机肥添加、免耕、秸秆还田等)已 经实施,这有利于农田土壤有机碳含量的增加,有机碳含量增加的最大限度被称为碳固存潜力。评估当前的 有机碳含量到达碳固存潜力的时间可以帮助我们改善土壤农田管理实践,为修复退化土壤提供理论支撑。基 于农田的平均固碳速率,我们的研究表明不同开垦年限坡耕地侵蚀区和沉积区土壤达到固碳潜力分别需要 20—181 a 和 13—66 a(表 4),这与 Qin 等人^[22]和 Yan 等人^[43]的研究结果较为接近。然而平均固碳速率值是 在最优管理条件下获得的,实际农田管理实践中侵蚀区和沉积区达到固碳潜力的时间可能更长。

4 结论

东北黑土区坡耕地土壤侵蚀-沉积作用以及长期耕作扰动显著影响有机碳以及固碳潜力的空间变化。总有机碳、有机碳密度、碳饱和水平均表现为沉积区显著大于侵蚀区,表土显著大于底土,随着开垦年限增加表现为先降低后增加的规律,且均在开垦 30 a 坡耕地达到最大值。固碳潜力则表现为侵蚀区(1.24—2.89 kg/m²)显著大于沉积区(0.79—1.04 kg/m²),底土(0.83—3.59 kg/m²)显著大于表土(0.6—2.53 kg/m²),随着开垦年限的增加表现为开垦 30 a 显著小于开垦 40 a、60 a。黑土坡耕地侵蚀区和沉积区土壤达到固碳潜力分别需要 20—181 a 和 13—66 a。不同开垦年限坡耕地、不同坡位、不同土层土壤有机碳含量与固碳潜力存在差异,在坡耕地经营管理过程中需要考虑不同坡位有机碳库分布及动态特征,以高效利用黑土资源,科学修复退化黑土。

参考文献(References):

- Zomer R J, Bossio D A, Sommer R, Verchot L V. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15554.
- [2] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson G P, Smith P. Climate-smart soils. Nature, 2016, 532(7597): 49-57.
- [3] Chen S C, Martin M P, Saby N P A, Walter C, Angers D A, Arrouays D. Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France. Science of the Total Environment, 2018, 630(Jul.15): 389-400.
- [4] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, Mitsch W J, Lehmann J, Nair P K R, McBratney A B, De Moraes Sú J C, Schneider J, Zinn Y L, Skorupa A L A, Zhang H L, Minasny B, Srinivasrao C, Ravindranath N H. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 73(6): 145A-152A.
- [5] 田慎重, 王瑜, 宁堂原, 董晓霞, 董亮, 郑东峰, 郭洪海. 转变耕作方式对长期旋免耕农田土壤有机碳库的影响. 农业工程学报, 2016, 32(17): 98-105.
- [6] Zhao P Z, Li S, Wang E H, Chen X W, Deng J F, Zhao Y S. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in the black soil region of China. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 72-81.
- [7] 赵鹏志,陈祥伟,王恩姮.黑土坡耕地有机碳及其组分累积-损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应.应用生态学报,2017,28(11): 3634-3642.
- [8] Wang X, Cammeraat L H, Wang Z, Zhou J, Govers G, Kalbitz K. Stability of organic matter in soils of the Belgian Loess Belt upon erosion and deposition. European Journal of Soil Science, 2013, 64(2): 219-228.
- [9] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [10] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, Geuß U, Hangen E, Reischl A, Schilling B, Von Lützow M, Kögel-Knabner I. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. Global Change Biology, 2014, 20(2): 653-665.
- [11] Boddey R M, Jantalia C P, Conceição P C, Zanatta J A, Bayer C, Mielniczuk J, Dieckow J, Dos Santos H P, Denardin J E, Aita C, Giacomini S J, Alves B J R, Urquiaga S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. Global Change Biology, 2010, 16 (2): 784-795.
- [12] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry, 2007, 86 (1): 19-31.
- [13] Angers D A, Arrouays D, Saby N P A, Walter C. Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. Soil Use and Management, 2011, 27(4): 448-452.
- [14] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, Lang B, Von Lützow M, Marin-Spiotta E, Van Wesemael B, Rabot E, Ließ M, Garcia-Franco N,

Wollschläger U, Vogel H J, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma, 2019, 333: 149-162.

- [15] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, Gao X F, Liu G. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(7): 1005-1021.
- [16] 姜蓝齐, 臧淑英, 张丽娟, 孙丽, 阎炳和. 松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算. 生态学报, 2017, 37(21): 7068-7081.
- [17] Liang A Z, Yang X M, Zhang X P, McLaughlin N, Shen Y, Li W F. Soil organic carbon changes in particle-size fractions following cultivation of Black soils in China. Soil and Tillage Research, 2009, 105(1): 21-26.
- [18] 陈立新. 土壤实验实习教程. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005: 24-32.
- [19] 徐嘉晖,高雷,孙颖,崔晓阳.大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力.土壤学报,2018,55(1):236-246.
- [20] 张春华, 王宗明, 任春颖, 宋开山, 张柏, 刘殿伟. 松嫩平原玉米带农田土壤有机碳时空格局. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 300-307.
- [21] Feng W T, Plante A F, Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. Biogeochemistry, 2013, 112(1-3): 81-93.
- [22] Qin Z C, Huang Y. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland: a model approach. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 868-884.
- [23] Cheng K, Zheng J, Nayak D, Smith P, Pan G. Re-evaluating the biophysical and technologically attainable potential of topsoil carbon sequestration in China's cropland. Soil Use and Management, 2013, 29(4): 501-509.
- [24] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 229-236.
- [25] Feng W T, Shi Z, Jiang J, Xia J Y, Liang J Y, Zhou J Z, Luo Y Q. Methodological uncertainty in estimating carbon turnover times of soil fractions. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 100: 118-124.
- [26] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [27] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [28] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281-305.
- [29] 金琳,李玉娥,高清竹,刘运通,万运帆,秦晓波,石锋.中国农田管理土壤碳汇估算.中国农业科学,2008,41(3):734-743.
- [30] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,韩勇.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响.土壤学报,2016,53(3):572-581.
- [31] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,阎志丹.水分对土壤呼吸的影响及机理.生态学报,2003,23(5):972-978.
- [32] Lal R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. Global Change Biology, 2018, 24(8): 3285-3301.
- [33] Torres-Sallan G, Schulte R P O, Lanigan G J, Byrne K A, Reidy B, Simó I, Six J, Creamer R E. Clay illuviation provides a long-term sink for C sequestration in subsoils. Scientific Reports, 2017, 7: 45635.
- [34] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. Advances in Agronomy, 2005, 88(5): 35-66.
- [35] Kell D B. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. Philosophical Transactions of the Royal Society B; Biological Sciences, 2012, 367(1595); 1589-1597.
- [36] Haddaway N R, Hedlund K, Jackson L E, Kätterer T, Lugato E, Thomsen I K, Jørgensen H B, Isberg P E. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review protocol. Environmental Evidence, 2016, 5(1): 1.
- [37] Lynch J P, Wojciechowski T. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8): 2199-2210.
- [38] Alcántara V, Don A, Vesterdal L, Well R, Nieder R. Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils-implications for carbon stocks. Scientific Reports, 2017, 7(1): 5511.
- [39] Tautges N E, Chiartas J L, Gaudin A C M, O'Geen A T, Herrera I, Scow K M. Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops and compost on soil carbon sequestration differ in surface and subsurface soils. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3753-3766.
- [40] Jones D L, Magthab E A, Gleeson D B, Hill P W, Sánchez-Rodríguez A R, Roberts P, Ge T, Murphy D V. Microbial competition for nitrogen and carbon is as intense in the subsoil as in the topsoil. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 117: 72-82.
- [41] Hobley E, Baldock J, Hua Q, Wilson B. Land-use contrasts reveal instability of subsoil organic carbon. Global Change Biology, 2017, 23(2): 955-965.
- [42] 李忠佩,林心雄,车玉萍.中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析.土壤学报,2002,39(3):351-360.
- [43] Yan H M, Cao M K, Liu J Y, Tao B. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved soil management in agricultural soils of China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 121(4): 325-335.