

不同开垦年限坡地黑土耕层土壤有机碳库分配特征

翟国庆 李永江 韩明钊 王思姮*

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 因耕作和侵蚀的共同作用,农田坡地景观多为坡上侵蚀、坡下沉积的空间格局,同时伴随侵蚀区和沉积区土壤有机碳(SOC)含量及稳定机制的差异.为探明长期耕作的农田黑土有机碳库积累-损耗特征,采用 Stewart 物理-化学联合分组方法,以典型黑土区不同开垦年限坡耕地为研究对象,探讨基于侵蚀-沉积作用的不同稳定机制碳库(游离未保护碳、物理保护碳、化学保护碳、生物化学保护碳)的分配特征.结果表明:长期耕作与侵蚀导致坡下沉积区显著富积 SOC,4种碳库含量整体表现为沉积区显著大于侵蚀区;黑土区坡耕地 SOC 以化学保护碳库和生物化学保护碳库为主(>90%),侵蚀区主要积累化学保护有机碳(84.6%),沉积区主要积累生物化学保护有机碳(51.4%);随着开垦年限的延长,4种碳库积累速率随着碳稳定程度的增加而增加,为生物化学保护碳库(48%)>化学保护碳库(42.2%)>物理保护碳库(6.4%)>游离未保护碳库(3.4%);游离未保护有机碳库占比和积累速率最小,但其对外界干扰最敏感,在黑土管理过程中应引起足够重视.

关键词 长期耕作; 稳定机制; 碳库; 碳积累速率; 侵蚀-沉积区; Stewart 物理-化学联合分组

Distribution characteristic of soil organic carbon pool in the plow layer of sloping farmland with different cultivation years in black soil region. ZHAI Guo-qing, LI Yong-jiang, HAN Ming-zhao, WANG En-heng* (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China).

Abstract: Tillage and erosion simultaneously cause soil movement from the top-slope position to the foot-slope position in a sloping farmland, with consequences on variation of soil organic carbon (SOC) content as well as its stability mechanism. To identify the accumulation-loss characteristics of organic carbon pool (OCP) of black soil under long-term cultivation, the distribution characteristics of different OCPs (free unprotected, physical protection, chemical protection, biochemical protection) of sloping farmland with different years of cultivation were quantified by Stewart physical-chemical fractionation method. The results showed that long-term cultivation and associated erosion resulted in significant accumulation of SOC in the foot-slope deposition area. The contents of four OCPs in the foot deposition area were significantly higher than those in top-slope eroded areas. SOC of sloping farmland was dominated by chemically protected carbon and biochemically protected carbon (>90%). Furthermore, the top-slope erosion areas and foot-slope deposition areas mainly accumulated chemically protected organic carbon (84.6%) and biochemically protected organic carbon (51.4%), respectively. With the increases of cultivation years, the accumulation rate of four OCPs increased with the stability degree of SOC, that is, biochemical protection carbon pool (48%) > chemical protection carbon pool (42.2%) > physical protection carbon pool (6.4%) > free unprotected carbon pool (3.4%). The proportion and accumulation rate of the free unprotected organic carbon pool were the smallest, but they were most sensitive to external interference. Thus, more attention should be paid to free unprotected organic carbon during the management of black soil.

Key words: long-term tillage; stabilization mechanism; carbon pool; carbon accumulation rate; erosion-deposition area; Stewart physical-chemical fractionation.

本文由国家林业局林业公益性行业科研专项(201404202)和中央高校基本科研业务费专项(2572017CA05)资助 This work was supported by the National Forestry Industry Research Special Fund for Public Welfare Forest Research (201404202) and the Fundamental Research Fund for Central Universities (2572017CA05).

2019-04-26 Received, 2019-11-08 Accepted.

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

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,也是世界黑土集中分布区中面积最小、开垦强度最大的区域,仅坡耕地水土流失面积即占黑土区总水土流失面积的46%^[1],有机质含量已从开垦前的100~120 g·kg⁻¹降至40~50 g·kg⁻¹^[2],黑土质量退化潜在威胁区域生态环境安全和国家粮食安全.高强度无休机械耕作与坡面侵蚀的共同作用可能是加速黑土有机质(碳)迁移和损耗的主要原因^[3].如近期研究指出,黑土坡耕地铧式犁仅单次耕作系数即可达234 kg·m⁻¹^[3],在耕作迁移过程中加快了土壤团聚体的周转速率,进而扰乱团聚体有机碳的稳定过程,加剧矿化.与此同时,黑土坡耕地较长的坡面也为径流迁移团聚体提供了较长的路径,在水蚀过程中筛选、破坏、剥蚀土壤团聚体,使有机碳暴露矿化^[4-5].由此可见,东北黑土区机械耕作制度以及特殊的地形和侵蚀环境使其有别于西北高原(黄土)^[6]、西南山地(紫土)^[7]、南方丘陵(红壤)^[8]地区农田有机碳的损耗-补偿动态特征.

土壤碳库是全球碳循环的重要组成部分,尤其较为活跃的表层土壤有机碳库对农业生产和管理过程的响应较为敏感^[9];长期耕作的农田坡地景观中多为坡上侵蚀、坡下沉积的空间格局^[5,10].一般情况下,坡上侵蚀区土壤碳库动态替代速率低于侵蚀速率而导致碳储量下降^[11];也有研究发现,适度侵蚀可促进碳固存^[12],因为侵蚀首先损耗不稳定SOC,使相对稳定的SOC富集,减少了矿化速率^[13].在坡下沉积区,每年因侵蚀携带而埋藏的SOC可达0.6~1.6 Gt^[13].但关于沉积区SOC矿化速率始终存在争议:一方面认为,沉积埋藏作用使得土壤剖面形成密闭的厌氧环境,限制了矿化^[14];另一方面认为,在沉积区富集埋藏的是优先被侵蚀的不稳定SOC,其可促进酶活性和微生物活动,增加矿化速率^[11].由此看来,农业景观中因耕作和土壤侵蚀-沉积过程的交互作用,使得组成复杂、组分多样的SOC在坡上侵蚀区和坡下沉积区表现出不同的稳定机制,进而导致不同稳定机制碳库的分配差异^[15].

本研究以典型黑土区长期(30~60 a)机械作业的坡耕地表层土壤(0~30 cm)为研究对象,对比分析坡上侵蚀区、坡下沉积区未保护有机碳(活性有机碳)和不同稳定机制(物理保护、化学保护、生物化学保护)有机碳库的分配特征,以期为评价黑土坡耕地有机碳库的周转和损失提供依据,为有效防治水、土、碳流失,维系黑土农田生产力提供参考.

1 研究地区与研究方法

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,属于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耙整平是最常用的整地管理措施,多年平均整地深度(耕层)约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30 a(48°17′9″ N, 125°25′51″ E)、40 a(48°17′2″ N, 125°26′15″ E)的坡耕地(S₃₀和S₄₀),于20连队选择开垦年限为60 a(48°15′23″ N, 125°20′1″ E)的坡耕地(S₆₀)为研究对象,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的代表.由于土壤自身重力、长期耕作迁移以及水蚀的共同作用,坡上形成净迁移侵蚀区,而在坡下形成净迁入沉积区^[16].为对比侵蚀区和沉积区不同稳定机制碳库差异,分别在30、40和60 a坡耕地的坡上(约距坡顶端10、20、40 m)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 m×0.5 m×1 m).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50~60 cm,70 cm以下均处于长期浸水状态.采用剖面机械分层法于0~10、10~20、20~30 cm土层分别收集土壤样品约2 kg带回实验室,在通风透气处自然风干,过2 mm筛剔除小石块和植物根系,用于机械组成和有机碳含量分析,同时,采用环刀法测得土壤容重和含水量,各层各指标重复3次.坡耕地耕层0~30 cm土壤基本性质见表1.

1.3 样品处理与分析

采用Stewart^[17]物理-化学联合分组方法获得11种有机碳组分(图1).具体操作为:1)团聚体分离:使用团聚体分离器将过2 mm筛的风干土样分为3个部分:>250 μm的粗颗粒有机质(cPOM),53~250 μm的微团聚体部分(μagg)、容易分散的<53 μm的黏粒粉粒结合部分,然后使用离心法将<53 μm部分再分为游离态黏粒(dclay)和游离态粉粒(dsilt);

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic properties of experimental site

样地 Site	坡度 Gradient (°)	坡长 Slope length (m)	样点 Position	土壤有机碳 SOC (g · kg ⁻¹)	土壤容重 Soil bulk density (g · cm ⁻³)	土壤含水量 Soil water content (%)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)
S ₃₀	6.7	68	ES	35.77±1.07Ba	1.06±0.12Ab	33.5±0.4Ba	31.4±4.5Aa	35.4±0.9Ab	33.2±0.9Ab
			DS	37.41±0.40Ab	1.06±0.01Ab	41.5±0.6Aa	33.8±3.0Aa	34.2±1.5Ab	32.0±1.5Ab
S ₄₀	4.8	121	ES	19.55±0.72Bc	1.21±0.04Aa	29.7±0.4Bb	22.1±3.0Bb	40.1±1.5Aa	37.9±1.5Aa
			DS	37.05±0.83Ab	1.29±0.02Aa	37.3±0.8Ab	30.1±1.6Aa	35.5±0.2Bb	33.3±1.6Bb
S ₆₀	3.6	200	ES	25.02±0.45Bb	1.17±0.10Aa	33.5±1.2Ba	26.9±0.0Aa	37.7±1.5Aa	35.5±1.5Aa
			DS	39.32±1.29Aa	1.25±0.11Aa	37.7±0.5Ab	25.5±1.6Ab	38.4±2.2Aa	36.2±2.2Aa

S₃₀: 开垦 30 年 30 years reclamation; S₄₀: 开垦 40 年 40 years reclamation; S₆₀: 开垦 60 年 60 years reclamation. SOC: Soil organic carbon. ES: 坡上侵蚀区 Eroded area on the slope; DS: 坡下沉积区 Deposited area under the slope. 不同大写字母代表侵蚀区和沉积区之间差异显著, 不同小写字母代表不同开垦年限之间差异显著 ($P < 0.05$) Different capital letters meant significant difference between eroded area and deposited area, and lower-case letters meant significant difference between different reclamation years at 0.05 level. 下同 The same below.

2) 密度浮选: 将上一步得到的微团聚体部分 (53 ~ 250 μm) 首先经过密度浮选, 得到细颗粒有机质 (LF), 再将剩余部分震荡过筛分散成物理保护有机质 (iPOM) 和来源于微团聚体的 <53 μm 的粉粒和黏粒组分, 然后使用离心法将 <53 μm 的部分再分为闭蓄态黏粒 (μclay) 和闭蓄态粉粒 (μsilt); 3) 酸解过程: 对前两步得到的游离态、闭蓄态的黏粒和粉粒进行酸性水解, 得到酸解组分 (H-dclay、H-dsilt、H-μclay、H-μsilt) 和不能被酸解的组分 (NH-dclay、NH-dsilt、NH-μclay、NH-μsilt)。采用元素分析仪 vario TOC (Elementer, 德国) 测定 SOC 含量, 土壤不含碳酸盐, 结果即为总碳含量。

由于以上 11 种 SOC 组分的稳定机制不同, 可将其划分为 4 个碳库: 1) 游离未保护碳库, 包含

cPOM 和 LF; 2) 物理保护碳库, 包含 iPOM; 3) 化学保护碳库, 包含 H-dclay、H-dsilt、H-μclay、H-μsilt; 4) 生物化学保护碳库, 包含 NH-dclay、NH-dsilt、NH-μclay、NH-μsilt。

1.4 指标计算

采用以下公式计算不同稳定机制的碳库含量 (C_F , g C · kg⁻¹):

$$C_F = \sum C_i M_i \quad (1)$$

式中: C_i 为不同稳定机制碳库所包含的各组分有机碳含量 (g C · kg⁻¹); M_i 为不同稳定机制碳库所包含的各组分质量占全土质量的比例 (%) (数据未给出)。

采用以下公式计算各碳库含量占总有机碳含量的比例 (C_R , %):

$$C_R = 100 \times C_F / C_T \quad (2)$$

式中: C_T 为总有机碳含量 (g C · kg⁻¹)。

依据 Stewart 等^[18] 一阶分解动力学方程 $y = a + kx$ 分析不同稳定机制碳库含量 (y) 随总有机碳含量 (x) 增加而积累的速率。其中, a 和 k 是常数, k 表示相应碳库的积累速率^[19], 积累速率不同, 代表总碳库向不同稳定机制碳库分配的比例不同。

1.5 数据处理

在对比分析不同开垦年限耕层土壤有机碳组分、碳库含量时, 将 0~10、10~20、20~30 cm 各土层数据加权平均作为耕层土壤 (0~30 cm) 平均结果; 在分析不同稳定机制碳库含量积累速率时仍以 0~10、10~20、20~30 cm 各层数据为基础进行线性回归分析。采用 SPSS 23 软件进行统计分析, 不同开垦年限之间、侵蚀区与沉积区之间均采用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

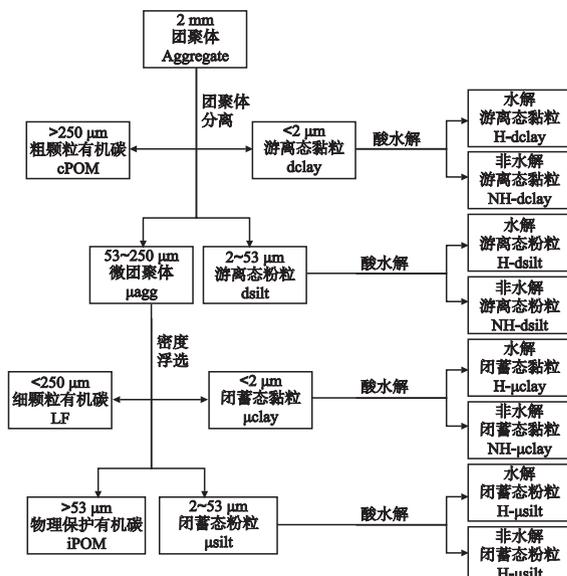


图 1 不同保护机制土壤有机碳组分分离流程图

Fig.1 Separation flow diagram of soil organic carbon components based on different protection mechanisms.

2 结果与分析

2.1 不同稳定机制有机碳组分含量

由表2可知,游离未保护有机碳组分(cPOM和LF)在不同开垦年限之间以及侵蚀区和沉积区之间均有显著差异,cPOM和LF分别在开垦30a和60a的坡耕地中含量最高,整体表现为沉积区>侵蚀区;仅开垦30a的坡耕地LF在侵蚀区大于沉积区。

物理保护有机碳组分(iPOM)在开垦60a的坡耕地中含量最高,且表现为侵蚀区显著大于沉积区;而开垦30a和40a坡耕地侵蚀区iPOM含量显著小于沉积区。

化学保护有机碳4种组分在不同开垦年限之间和不同侵蚀与沉积区之间均表现出不同的规律:水解游离态粉粒(H-dsilt)和水解闭蓄态粉粒(H- μ silt)在侵蚀区变化趋势一致,均在开垦30a坡耕地达到最大值;水解游离态黏粒(H-dclay)和水解闭蓄态黏粒(H- μ cloy)变化趋势相似,也均在开垦30a时达到最大值,但侵蚀区与沉积区的含量差异仅在开垦40a坡耕地达到显著水平,且侵蚀区<沉积区。

生物化学保护有机碳4种组分含量在不同开垦年限之间均表现为沉积区>侵蚀区;非水解游离态粉粒(NH-dsilt)、非水解游离态黏粒(NH-dclay)、非水解闭蓄态粉粒(NH- μ silt)碳含量均在开垦60a坡耕地侵蚀区达到最大值,非水解闭蓄态黏粒(NH- μ cloy)碳含量此时达到最小值,沉积区4种碳组分在开垦年限之间并没有明显的变化规律。

2.2 不同稳定机制有机碳库含量及占比

4种不同稳定机制有机碳库含量在侵蚀区与沉积区差异均达显著水平(表3)。随着开垦年限的增加,游离未保护有机碳库含量在侵蚀区呈现递减规律,在沉积区呈现先降低后增加趋势,且均在开垦30a坡耕地出现最大值。物理保护有机碳库含量在不同开垦年限之间均表现为沉积区显著大于侵蚀区,随着开垦年限的增加,在侵蚀区呈现递增规律,在沉积区先增加后降低,侵蚀区的最大值和沉积区的最小值均出现在开垦60a坡耕地。化学保护有机碳库含量在开垦30a时侵蚀区显著大于沉积区,在开垦40a和60a时沉积区显著大于侵蚀区。生物化学保护有机碳库含量均为沉积区显著大于侵蚀区,且二者之间的差异随着开垦年限的增加逐渐减小。

总体来看,不同开垦年限坡耕地化学碳库(23.3%~62.0%)和生物化学碳库(32.5%~66.9%)占总有机碳的比例大于游离未保护碳库(1.4%~

表2 不同开垦年限坡耕地侵蚀区和沉积区有机碳组分含量
Table 2 Content of organic carbon fractions in erosion and sediment areas of different sloping farmlands (g C · kg⁻¹)

碳库 C pool	碳组分 C fraction	样地 Site	ES	DS	
游离未保护 Unprotected	cPOM	S ₃₀	38.56±1.07Ba	42.56±1.03Aa	
		S ₄₀	17.09±0.34Bc	33.38±0.87Ac	
		S ₆₀	22.24±1.00Bb	35.47±0.83Ab	
	LF	S ₃₀	71.97±5.37Ab	20.68±0.51Bc	
		S ₄₀	25.56±0.72Bc	46.86±2.95Ab	
		S ₆₀	81.33±1.53Ba	115.96±0.66Aa	
物理保护 Physically-protected	iPOM	S ₃₀	28.49±2.33Bb	51.39±3.57Aa	
		S ₄₀	21.24±1.73Bc	43.98±0.51Ab	
		S ₆₀	57.65±1.96Aa	52.97±2.41Ba	
	化学保护 Chemically-protected	H-dsilt	S ₃₀	74.13±3.05Aa	46.41±4.14Bc
			S ₄₀	29.16±3.06Bb	54.60±3.03Ab
			S ₆₀	70.58±2.68Ba	131.48±2.96Aa
	H-dclay	S ₃₀	69.52±0.02Aa	53.64±2.07Ba	
		S ₄₀	24.20±1.14Bc	45.25±0.82Ab	
		S ₆₀	26.91±0.46Ab	28.83±0.43Ac	
	H- μ silt	S ₃₀	109.50±11.60Aa	105.30±4.92Aa	
		S ₄₀	68.63±0.8Ab	77.23±3.66Ab	
		S ₆₀	109.50±3.37Aa	97.70±6.37Ba	
	H- μ cloy	S ₃₀	41.84±3.29Aa	41.25±2.37Aa	
		S ₄₀	21.29±0.36Bb	33.79±1.76Ab	
		S ₆₀	23.66±0.86Bb	33.88±1.60Ab	
	生物化学保护 Biochemically-protected	NH-dsilt	S ₃₀	7.90±1.46Bc	31.79±1.42Aa
			S ₄₀	13.98±0.43Bb	23.15±0.65Ab
			S ₆₀	18.79±0.48Ba	24.48±1.14Ab
NH-dclay		S ₃₀	23.40±2.50Bb	40.78±0.95Ab	
		S ₄₀	20.83±0.06Bc	38.37±0.22Ac	
		S ₆₀	28.60±0.35Ba	44.70±0.39Aa	
NH- μ silt	S ₃₀	22.89±2.55Ba	33.31±1.57Aa		
	S ₄₀	14.06±0.11Bb	36.49±0.11Aa		
	S ₆₀	23.71±0.48Ba	36.26±0.80Aa		
NH- μ cloy	S ₃₀	41.01±2.31Ba	65.97±1.39Aa		
	S ₄₀	38.98±0.43Ba	48.10±0.36Ab		
	S ₆₀	30.07±0.93Bb	45.90±1.21Ac		

cPOM: 粗颗粒有机质 Coarse particle organic carbon; LF: 细颗粒有机质 Fine particle organic carbon; iPOM: 物理保护有机质 Physically-protected organic matter; dclay: 游离态黏粒 Free clay; dsilt: 游离态粉粒 Free silt; μ cloy: 闭蓄态黏粒 Closed clay; μ silt: 闭蓄态粉粒 Closed silt; H: 水解 Hydrolytic; NH: 非水解 Non-hydrolytic.

5.4%)和物理保护碳库(1.4%~6.8%)。沉积区均表现为生物化学碳库>化学碳库>物理碳库>游离未保护碳库;侵蚀区则随着开垦年限表现出不同的变化规律。

2.3 不同稳定机制有机碳库与总有机碳的关系

不同开垦年限坡耕地不同稳定机制碳库与总有机碳的关系不同(表4),开垦30、40、60a坡耕地侵蚀区和沉积区碳积累速率的最大值均出现在生物化学保护有机碳库或化学保护有机碳库。值得注意的是,随着总有机碳的增加,游离未保护有机碳库在开垦30a坡耕地沉积区表现为净积累(15.3%),而在

表 3 不同稳定机制碳库含量及其占总有机碳的比例

Table 3 Carbon pool content of different stabilization mechanisms and its proportion to total organic carbon

样地 Site	样点 Position	游离未保护 Unprotected		物理保护 Physically-protected		化学保护 Chemically-protected		生物化学保护 Biochemically-protected	
		含量 Content (g C · kg ⁻¹)	占比 Proportion (%)	含量 Content (g C · kg ⁻¹)	占比 Proportion (%)	含量 Content (g C · kg ⁻¹)	占比 Proportion (%)	含量 Content (g C · kg ⁻¹)	占比 Proportion (%)
S ₃₀	ES	1.48±0.07Ba	4.1	0.51±0.05Bb	1.4	22.16±0.61Aa	61.9	11.62±0.95Bb	32.5
	DS	1.59±0.05Aa	4.2	2.08±0.17Ab	5.6	8.70±0.94Bb	23.3	25.04±1.03Aa	66.9
S ₄₀	ES	1.04±0.03Ab	5.3	0.56±0.05Bb	2.9	6.67±0.99Bc	34.1	11.28±0.27Bb	57.7
	DS	0.53±0.01Bc	1.4	2.52±0.03Aa	6.8	14.03±0.65Aa	37.9	19.97±0.34Ac	53.9
S ₆₀	ES	0.68±0.01Bc	2.7	1.00±0.04Ba	4.0	8.12±0.37Bb	32.5	15.22±0.30Ba	60.8
	DS	1.43±0.01Ab	3.6	1.77±0.09Ac	4.5	14.87±0.86Aa	37.8	21.25±0.41Ab	54.0

表 4 不同稳定机制碳库碳积累速率(*k*)及其显著性(*P*)Table 4 Carbon accumulation rate of carbon pools with different stabilization mechanisms (*k*) and its significance (*P*)

样地 Site	碳库 C pool	ES		DS		ES+DS	
		<i>k</i>	<i>P</i>	<i>k</i>	<i>P</i>	<i>k</i>	<i>P</i>
S ₃₀	游离未保护 Unprotected	-0.046	0.395 (<i>n</i> =9)	0.153	<0.001 (<i>n</i> =9)	0.097	0.007 (<i>n</i> =18)
	物理保护 Physically-protected	0.057	0.014 (<i>n</i> =9)	-0.016	0.640 (<i>n</i> =9)	0.033	0.481 (<i>n</i> =18)
	化学保护 Chemically-protected	0.628	0.001 (<i>n</i> =9)	-0.058	0.724 (<i>n</i> =9)	-0.122	0.751 (<i>n</i> =18)
	生物化学保护 Biochemically-protected	0.361	0.040 (<i>n</i> =9)	0.921	<0.001 (<i>n</i> =9)	0.992	0.010 (<i>n</i> =18)
S ₄₀	游离未保护 Unprotected	0.117	0.006 (<i>n</i> =9)	-0.012	0.010 (<i>n</i> =9)	-0.007	0.648 (<i>n</i> =18)
	物理保护 Physically-protected	0.068	0.007 (<i>n</i> =9)	0.124	<0.001 (<i>n</i> =9)	0.107	<0.001 (<i>n</i> =18)
	化学保护 Chemically-protected	0.318	0.054 (<i>n</i> =9)	0.616	<0.001 (<i>n</i> =9)	0.428	<0.001 (<i>n</i> =18)
	生物化学保护 Biochemically-protected	0.496	0.010 (<i>n</i> =9)	0.272	0.010 (<i>n</i> =9)	0.471	<0.001 (<i>n</i> =18)
S ₆₀	游离未保护 Unprotected	0.080	0.002 (<i>n</i> =9)	-0.045	0.020 (<i>n</i> =9)	0.050	<0.001 (<i>n</i> =18)
	物理保护 Physically-protected	0.057	0.052 (<i>n</i> =9)	0.014	0.717 (<i>n</i> =9)	0.053	<0.001 (<i>n</i> =18)
	化学保护 Chemically-protected	0.249	0.162 (<i>n</i> =9)	1.444	<0.001 (<i>n</i> =9)	0.501	<0.001 (<i>n</i> =18)
	生物化学保护 Biochemically-protected	0.614	0.003 (<i>n</i> =9)	-0.413	0.103 (<i>n</i> =9)	0.396	<0.001 (<i>n</i> =18)
S ₃₀ +S ₄₀ +	游离未保护 Unprotected	0.043	0.004 (<i>n</i> =27)	0.079	0.007 (<i>n</i> =27)	0.034	0.001 (<i>n</i> =54)
S ₆₀	物理保护 Physically-protected	0.010	0.338 (<i>n</i> =27)	0.027	0.271 (<i>n</i> =27)	0.064	<0.001 (<i>n</i> =54)
	化学保护 Chemically-protected	0.846	<0.001 (<i>n</i> =27)	0.379	0.020 (<i>n</i> =27)	0.422	<0.001 (<i>n</i> =54)
	生物化学保护 Biochemically-protected	0.101	0.164 (<i>n</i> =27)	0.514	0.002 (<i>n</i> =27)	0.480	<0.001 (<i>n</i> =54)

粗体代表不同保护机制碳库含量($y, \text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$)随着总有机碳含量($x, \text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$)的增加而显著积累(正值)或显著损耗(负值) Boldfaced value represented significant accumulation (positive) or depletion (negative) of different carbon pools ($y, \text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) with increase of total organic carbon content ($x, \text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$).

开垦 40 a、60 a 坡耕地沉积区表现为净损耗(-1.2%、-4.5%)。从 3 个坡面数据整体来看,侵蚀区碳积累速率为化学保护有机碳(84.6%)>游离未保护有机碳(4.3%);沉积区碳积累速率为生物化学保护有机碳(51.4%)>化学保护有机碳(37.9%)>游离未保护有机碳(7.9%)。随着坡耕地开垦年限从 30 a 增至 40 a 和 60 a,与总有机碳关系密切的不同稳定机制有机碳库也从 2 种(游离未保护、生物化学保护)增至 3 种(物理保护、化学保护、生物化学保护)和 4 种。另外,综合分析全坡和全侵蚀-沉积区总有机碳与不同稳定机制有机碳库的关系发现,碳库积累速率随着不同碳库稳定程度的增加而增加,即生物化学保护有机碳(48.0%)>化学保护有机碳(42.2%)>物理保护有机碳(6.4%)>游离未保护有机碳(3.4%)。

3 讨 论

长期耕作与侵蚀导致坡下沉积区相对坡上侵蚀区 SOC 显著富积^[20-21](表 1),但随着开垦年限的延长,不同稳定机制有机碳组分含量及碳库分配在侵蚀-沉积区的变化规律有所差异。

游离未保护有机碳主要由未完全分解的植物残体组成,属活性有机碳,在耕作过程中损耗速度最快^[22-23],所以含量较低。本研究中该碳库仅占总有机碳含量的 1.4%~5.4%。但游离未保护碳却是对外界干扰响应最敏感的碳组分,耕作和侵蚀破碎粗颗粒有机质(cPOM),且径流侵蚀优先运输细颗粒有机质(LF)至坡底^[24],导致侵蚀区 cPOM 明显降低,沉积区 LF 有效积累。但也有研究显示,沉积区 LF 没有显著积累,因为 LF 在迁移和累积过程中易被微

生物分解^[25-26]. 本研究中沉积区 LF 显著积累的原因之一可能是长期大机械耕作导致 LF 短时间大量迁移至坡底, 坡地土壤含水量较高, 厌氧环境抑制微生物活性, 从而有效保存 LF.

物理保护是指土壤通过团聚作用在微生物和酶及其底物之间形成物理屏障, 降低团聚体内部微生物活性, 使有机质正向积累^[26]. 坡耕地人为加速侵蚀, 一方面破坏团聚体, 使团聚体结构丧失^[27], 加速侵蚀区物理保护有机碳矿化, 而沉积区相对较高的含水量抑制氧气扩散, 微生物活性的降低使物理保护有机碳长期积累, 所以, 随着开垦年限增加, 沉积区物理保护有机碳碳库显著大于侵蚀区; 另一方面, 长期强烈的耕作扰动在去除表土层的同时, 底层矿物有机碳暴露并与部分被侵蚀的碳结合形成有机-矿物复合物^[12], 重新包裹有机碳而使有机碳物理稳定, 导致开垦 60 a 坡耕地侵蚀区物理保护有机碳含量最高.

化学保护有机碳是指土壤有机质与土壤矿物之间通过化学或者物理化学作用结合的有机碳^[27]. 由于土壤侵蚀使得贫碳的底土矿物暴露, 而具有较大比表面的黏土矿物倾向于通过分子间作用力与细颗粒有机质(LF)结合, 使得化学保护有机碳稳定的同时也固存 LF, 因此, 化学保护有机碳库与 LF 在侵蚀区具有相似的分布规律.

生物化学保护有机碳是由于本身化学成分(如木质素和多酚等顽固性化合物)和土壤中物质通过化学络合过程而固定的有机碳^[28], 通常该碳库被认为是“被动碳库”^[29]. 这种类型碳库在耕作和侵蚀迁移过程中不易被矿化, 从而使得不同开垦年限坡耕地沉积区的碳含量显著大于侵蚀区. 这与方华军等^[30]的研究结果一致, 坡上侵蚀区与粉粒和黏粒结合的“被动碳库”虽然较难矿化, 但易被地表径流携带流失, 并大量累积在沉积区.

总体而言, 黑土坡耕地化学保护有机碳库和生物化学保护有机碳库占总有机碳的比例均明显大于物理保护有机碳库和游离未保护有机碳库. 这与 Berhe 等^[15]的研究结果相似, 即土壤中较大比例的碳分布在与矿物结合的颗粒(<53 μm)有机碳中. 全坡面碳积累速率也表现为生物化学保护有机碳(48%)>化学保护有机碳(42.2%)>物理保护有机碳(6.4%)>游离未保护有机碳(3.4%), 说明碳库积累速率随着不同碳库稳定程度的增加而增加, 在人为加速侵蚀的农田坡耕地, 总有机碳库主要向生物化学保护碳库和化学保护碳库分配. 进一步分析发

现, 侵蚀区主要积累化学保护有机碳(84.6%), 沉积区主要积累生物化学保护有机碳(51.4%). 因为侵蚀区底层土壤矿物上移、裸露、吸附有机质形成有机-矿物复合物^[28], 增加了化学保护有机碳; 而沉积区由于长期积水环境抑制真菌活性, 使得沉积区好氧木质素有效保存^[31]. 此外, 游离未保护碳库在开垦 30 a 坡耕地沉积区表现为净积累(15.3%), 而在开垦 40、60 a 坡耕地沉积区均表现为净损耗(-1.2%、-4.5%), 再次印证了其对长期耕作和侵蚀干扰的敏感性. 同时, 该碳库也是最容易修复的碳库, 长期合理施肥可显著增加游离未保护有机碳含量^[32-33]. 这可能成为黑土质量修复的切入点.

4 结 论

黑土区坡耕地有机碳以化学保护碳库和生物化学保护碳库为主(>90%), 游离未保护和物理保护碳库占比之和不足 10%; 各碳库含量整体表现为沉积区显著大于侵蚀区; 侵蚀区主要积累化学保护有机碳(84.6%), 沉积区主要积累生物化学保护有机碳(51.4%); 随着开垦年限的延长, 4 种碳库积累速率随着碳稳定程度的增加而增加, 即生物化学保护碳库(48.0%)>化学保护碳库(42.2%)>物理保护碳库(6.4%)>游离未保护碳库(3.4%). 游离未保护有机碳库占比和积累速率虽小, 但其对外界干扰最敏感, 在考虑黑土坡耕地质量修复时, 应引起足够的重视.

致谢 感谢黑龙江省克山农场林业公司陈秀峰经理、成文福书记在样地选择时给予的帮助和支持, 感谢东北林业大学林学院水土保持与荒漠化防治学科研究生李露、曹伟、陈月明在取样和室内分析过程中的指导.

参考文献

- [1] Li R (李 锐). Opportunities and challenges of basic research on soil and water loss in China. *Chinese Journal of Nature* (自然杂志), 2008, **30**(1): 6-11 (in Chinese)
- [2] Sui Y-Y (随跃宇), Zhang X-Y (张兴义), Zhang S-L (张少良), et al. Soil organic matter actuality of the black soil farmland in Heilongjiang counties. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(1): 186-188 (in Chinese)
- [3] Zhao P-Z (赵鹏志), Chen X-W (陈祥伟), Wang E-H (王恩姬). Quantitative assessment of tillage erosion on typical sloping field in black soil area of northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(12): 151-157 (in Chinese)

- [4] Berhe AA, Harden JW, Torn MS, *et al.* Linking soil organic matter dynamics and erosion-induced terrestrial carbon sequestration at different landform positions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, **113**: G04039, DOI: 10.1029/2008JG000751
- [5] Kirkels FMSA, Cammeraat LH, Kuhn NJ. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes: A review of different concepts. *Geomorphology*, 2014, **226**: 94–105
- [6] Wang C-H (王超华). Effects of Rainfall Erosion on Soil Organic Carbon, Soil Water and Soil Temperature on the Loess Plateau. PhD Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2016 (in Chinese)
- [7] Fan H-Z (樊红柱), Zhang J-H (张建辉), Zhang J (张冀), *et al.* Response of soil labile organic carbon to soil erosion on slope farmland in mountainous area of northern Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2015, **29**(4): 57–60, 126 (in Chinese)
- [8] Nie X-D (聂小东). Effects of Water Erosion on the Mechanisms of Soil Organic Carbon Migration, Redistribution and Stability in the Red Soil Hilly Region. PhD Thesis. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese)
- [9] Gulde S, Chung H, Amelung W, *et al.* Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**: 605–612
- [10] Doetterl S, Berhe AA, Nadeu E, *et al.* Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Science Reviews*, 2016, **154**: 102–122
- [11] Lal R. Response to comments on “Managing Soil Carbon”. *Science*, 2004, **305**: 1567d
- [12] Xiao HB, Li ZW, Chang XF, *et al.* The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. *Geoderma*, 2018, **329**: 73–81
- [13] Nadeu E, Berhe AA, De VJ, *et al.* Erosion, deposition and replacement of soil organic carbon in Mediterranean catchments: A geomorphological, isotopic and land use change approach. *Biogeosciences*, 2012, **9**: 1099–1111
- [14] Van Oost K, Quine TA, Govers G, *et al.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 2007, **318**: 626–629
- [15] Berhe AA, Harden JW, Torn MS, *et al.* Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**: G02019, DOI: 10.1029/2011JG001790
- [16] Zhao P-Z (赵鹏志), Chen X-W (陈祥伟), Wang E-H (王恩姬). Responses of accumulation-loss patterns for soil organic carbon and its fractions to tillage and water erosion in black soil area. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2017, **28**(11): 3634–3642 (in Chinese)
- [17] Stewart CE, Plante AF, Paustian K, *et al.* Soil carbon saturation: Linking concept and measurable carbon pools. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**: 379–392
- [18] Stewart CE, Paustian K, Conant RT, *et al.* Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 2007, **86**: 19–31
- [19] Xu X, Zhang W, Xu M, *et al.* Characteristics of differently stabilised soil organic carbon fractions in relation to long-term fertilisation in Brown Earth of Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 1101–1110
- [20] Cheng S, Fang H, Zhu T, *et al.* Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in black soil region, Northeast China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, **56**: 521–529
- [21] Wang X, Cammeraat LH, Wang Z, *et al.* Stability of organic matter in soils of the Belgian Loess Belt upon erosion and deposition. *European Journal of Soil Science*, 2013, **64**: 219–228
- [22] John B, Yamashita T, Ludwig B, *et al.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*, 2005, **128**: 63–79
- [23] Don A, Scholten T, Schulze ED. Conversion of cropland into grassland: Implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, **172**: 53–62
- [24] Kuhn NJ, Hoffmann T, Schwanghart W, *et al.* Agricultural soil erosion and global carbon cycle: Controversy over? *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, **34**: 1033–1038
- [25] Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明), Zhang X-P (张晓平), *et al.* Effects of soil erosion and deposition on loss and accumulation of soil organic carbon in physical fractions. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2007, **44**(3): 467–474 (in Chinese)
- [26] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 2099–2103
- [27] Six J, Conant RT, Paul EA, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, **241**: 155–176
- [28] Doetterl S, Six J, Van Wesemael B, *et al.* Carbon cycling in eroding landscapes: Geomorphic controls on soil organic C pool composition and C stabilization. *Global Change Biology*, 2012, **18**: 2218–2232
- [29] Dou S (窦森), Li K (李凯), Guan S (关松). A review on organic matter in soil aggregates. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2011, **48**(2): 412–418 (in Chinese)
- [30] Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明), Zhang X-P (张晓平), *et al.* Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the Black Soil region, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2006, **26**(9): 2847–2854 (in Chinese)

- [31] Baldock JA, Oades JM, Nelson PN, *et al.* Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Soil Research*, 1997, **35**: 1061–1083
- [32] Wang X-L (王小利), Guo Z (郭振), Duan J-J (段建军), *et al.* The changes of organic carbon and its fractions in yellow paddy soils under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2017, **50**(23): 4593–4601 (in Chinese)
- [33] Zhang L-M (张丽敏), Xu M-G (徐明岗), Lou Y-L

(娄翼来), *et al.* Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2014, **47**(19): 3817–3825 (in Chinese)

作者简介 翟国庆, 男, 1994年生, 硕士研究生. 主要从事黑土有机碳稳定机制研究. E-mail: zgq196@outlook.com

责任编辑 张凤丽

封面说明

封面照片由兰州大学资源环境学院巩杰博士拍摄于白龙江流域源头区. 白龙江发源于甘肃省碌曲县和四川若尔盖县交界的岷山北麓, 是嘉陵江上游最大的支流, 也是长江上游水源涵养与水土保持的重要生态区域. 甘肃白龙江流域(32°36′—34°24′ N, 103°30′—106°0′ E)地处黄土高原、秦巴山地向青藏高原的生态过渡带, 是长江上游的主要水源区和生态屏障, 极具典型性和代表性. 甘肃白龙江流域内地貌类型复杂多样, 有山地、丘陵、河谷、盆地、高寒草甸等多种地貌景观. 受人类活动和灾害扰动的影响, 流域景观和土地覆盖已经和正在发生明显的变化, 是开展人类活动和生态系统服务研究的天然实验室.