

黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响^{*}

方华军^{1,2} 杨学明^{2,3} 张晓平² 梁爱珍² 申艳²

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

(3 Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture & Agri Food Canada, Hamow, Ontario, NOR 1G0, Canada)

摘要 以侵蚀和沉积过程明显的黑土坡耕地为研究对象, 通过测定不同地形部位表层和典型剖面土壤不同粒级的水稳性团聚体、颗粒态有机碳(POC)以及团聚体结合态有机碳含量, 探讨土壤侵蚀和沉积对土壤有机碳(SOC)损失、迁移和累积过程的影响。研究结果表明: 上坡三个侵蚀部位表层土壤大团聚体、矿质结合态有机碳(MOC)以及团聚体结合态有机碳含量随侵蚀速率增加而减小; 沉积部位(尤其是坡脚) POC含量和 POC/SOC 较低, 而 MOC 含量和 MOC/SOC 较高。始终处于沉积状态的坡脚部位, 各粒级有机碳组分的深度分布均表现出土壤累积和埋藏特征, 并随着粒级的减小累积现象趋于明显。上述结果反映了土壤侵蚀优先与细颗粒和微团聚体结合的 SOC 迁移流失, 并在低洼的沉积区累积; 埋藏层中的侵蚀物质(如微团聚体、颗粒态有机质)通过深埋作用和重新团聚作用形成稳定的大团聚体, 最终促进 SOC 的固定。

关键词 土壤侵蚀; 水稳性团聚体; 颗粒态有机碳; 团聚体结合态有机碳; 黑土

中图分类号 S153 **文献标识码** A

土壤侵蚀从土壤团聚体破坏、颗粒分离到侵蚀物质在景观中发生迁移/再分布、最后在洼地或海洋生态系统中沉积, 共经历了四个阶段^[1]。土壤有机碳(SOC)含量在这四个阶段均发生显著变化, 并因土壤水热状况、有机物的质量和数量、土壤属性的差异而不同^[1]。土壤侵蚀引起土壤水稳性大团聚体的分散和破坏, 使原先被大团聚体包裹的有机碳暴露, 在微生物作用下分解矿化, 加速大团聚体的周转, 最终导致 SOC 含量减少^[1~3]。并且, 与不同粒级团聚体结合的有机碳对微生物分解矿化存在不同程度的响应^[4~6]。与此同时, 侵蚀物质如土壤粘粒、颗粒态有机质(POM)、微团聚体等沿坡迁移, 在低洼的沉积部位累积; 加之土壤水分和营养元素的输入, 促进了生物量的形成和团聚体的稳定, 进而减缓 SOC 的矿化^[7~9]。但是, 上述观点都基于如下假设: 沉积区粘粒和水分含量增加, 形成一个难氧化环境, 促进 SOC 累积, 避免其矿化。但上述假设在田间还有待验证。而且, 当前对景观中由土壤再分布引起的 SOC 损耗和截留过程与机理认识不足, 尤其是对深埋作用下

沉积区埋藏土壤中的有机碳动态缺乏深入的研究。本文主要研究目的是: (1) 以常年处于氧化环境, 土壤侵蚀和沉积明显的东北黑土旱田坡耕地为研究对象, 从土壤结构出发, 研究土壤侵蚀和沉积对不同粒级颗粒和团聚体结合态有机碳的影响。(2) 选择典型地形断面(Transect), 研究不同地形部位各粒级颗粒和团聚体结合态有机碳含量的深度变化特征, 分析侵蚀碳的迁移及截留(Sequestration)过程。研究结果将在一定程度上解释土壤侵蚀和沉积引起的 SOC 损耗和截留机理。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于东北黑土区南部沫石河小流域(北纬 44° 43', 东经 125° 52')。属于半湿润温带大陆性季风气候, 年均气温 4.5℃, 年均降水 533.7 mm。采样区位于集水盆地北坡, 地形为典型的“S”型坡, 坡长为 253 m, 坡度小于 5°, 最大相对

* 中国科学院国外杰出人才支持项目(K09Z3)和国家自然科学基金项目(40601097 和 40471125)资助

作者简介: 方华军(1978-), 男, 安徽巢湖人, 博士后, 主要从事土壤侵蚀和土壤碳循环方面的研究。E-mail: huajunfang@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-12-12; 收到修改稿日期: 2006-10-20

高程为 11.7 m。沿坡选择 3 个地形断面, 每个断面相距 25 m, 在每个断面上划分坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡趾等 5 个部位, 各部位间的距离分别为 15 m、75 m、95 m 和 40 m。采样点位置分布图参见文献[10]。各地形部位坡度、土壤侵蚀状况以及

部分土壤属性如表 1 所示。土壤原始植被为草原化草甸, 以杂草群落为主。研究区大概有 200 a 的开垦历史, 目前的土地利用方式为农田, 玉米连作一直是该区的主要种植方式, 长期顺向打垄和耕翻加剧了土壤沿坡面的再分布。

表 1 研究区各地形部位表层土壤(0~20 cm)属性¹⁾

Table 1 Properties of topsoil (0~20 cm) in each geomorphic position of the study area

地形部位 Geomorphic positions	坡度 Slope(°)	土壤侵蚀速率 ²⁾ Soil erosion rate (t hm ⁻² a ⁻¹)	土壤有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	pH	土壤水分 Soil moisture (g kg ⁻¹)	粉粒 Silt (g kg ⁻¹)	粘粒 Clay (g kg ⁻¹)
坡顶 Summit	1.3	2.40	15.2±0.8	1.30±0.08	5.91±0.31	185±9	334±117	273±88
坡肩 Shoulder slope	3.7	62.02	11.8±0.5	1.23±0.02	5.92±0.26	190±7	467±62	183±59
坡背 Back slope	2.8	26.22	14.4±0.6	0.88±0.04	6.12±0.39	191±12	374±22	204±31
坡脚 Foot slope	2.3	-28.53	12.1±0.9	1.27±0.11	5.87±0.27	202±7	303±39	276±30
坡趾 Toe slope	1.3	-106.1	13.8±1.0	1.06±0.25	5.66±0.16	202±12	329±15	205±23

1) 表中数据为平均值±标准差, 来源于参考文献[11][12] Data in the table are means ± SD and cited from References[11][12]; 2) 正值代表侵蚀, 负值代表沉积 Positive value means erosion and negative value means deposition

1.2 土壤样品采集和分析方法

沿着 3 个地形断面, 用取土钻($\Phi=5$ cm) 多点采集各地形部位表层 0~20 cm 的土壤。同时, 根据土壤侵蚀梯度建立一个典型断面^[11], 断面上各部位挖掘一个深 2 m 左右的土坑。0~50 cm 范围土层以 5 cm 间隔进行采样, 50~100 cm 范围土层以 10 cm 间隔进行采样, 100 cm 以下土层以 20 cm 间隔进行采样。土样在田间湿度下过 7 mm 筛, 自然风干后保存。

土壤颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC) 按照 Cambardella 和 Elliott^[13] 提供的方法测定。将风干土过 2 mm 筛, 去除肉眼可见的植物根系等杂物。称取 10 g 预处理土样, 放入塑料瓶中, 加入 30 ml 5 g L⁻¹ 的六偏磷酸钠溶液, 在往复式振荡器上振荡 15 h, 分散。分散液置于 53 μ m 筛上, 用清水冲洗直至沥滤液澄清。再将筛上保留物分离为粗颗粒态有机质(Coarse POM, 250~2 000 μ m) 和细颗粒态有机质(Fine POM, 53~250 μ m)。各分离组分在 60 °C 下烘干称重, 计算其所占全土的百分比。然后, 将各粒级土壤颗粒磨碎过 100 目筛, 用元素分析仪(ThermoFinnigan, Italy) 测定其碳浓度(C g kg⁻¹ 土壤颗粒), 乘以各自所占土壤的百分比计算出粗、细

POC 的含量(C g kg⁻¹ 土)。矿质结合态有机碳(Mineral bound organic carbon, MOC, < 53 μ m) 为 SOC 和 POC 之差。

土壤水稳性团聚体参考 Yang 和 Wander^[14] 提供的方法测定。称取 25 g 风干土样, 放入水稳性团聚体分析仪套筛上(上下振幅为 30 mm, 频率为 30 r min⁻¹), 浸润 10 min 后, 湿筛 2 min。收集残留在 1 000 μ m 和 250 μ m 筛上的土壤颗粒, 烘干称重, 分别计算出粗大团聚体(> 1 000 μ m)、细大团聚体(250~1 000 μ m) 和微团聚体(< 250 μ m) 的质量分数。其中, 粗、细大团聚体统称为水稳性大团聚体(> 250 μ m)。然后将分离的各粒级水稳性团聚体磨碎过 100 目筛, 用元素分析仪测定其碳含量, 代表各粒级团聚体中有机碳的浓度(C g kg⁻¹ 团聚体)。而将团聚体结合态有机碳含量定义为单位质量土壤中含有某一粒级团聚体有机碳的量(C g kg⁻¹ 土), 等于该粒级团聚体所占百分比与团聚体碳浓度的乘积。因本研究供试黑土不含碳酸盐, 所以总碳即为总 SOC。

1.3 数据分析

利用 SAS 软件对数据进行单因素方差分析, 用 Fisher 最小显著度(LSD) 进行均值的比较检验。另外, 用该软件进行相关分析, 并用 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 表层 SOC 组分的变化特征

坡顶侵蚀微弱, 且没有上坡侵蚀泥沙输入的影响, 因此可作为其他地形部位的对照点。由表 2 可见, 坡肩 SOC 含量明显低于坡顶和坡背 ($p < 0.05$), 坡脚和坡趾的 SOC 含量也显著低于坡顶对照点。另外, 坡肩和坡背矿质结合态有机碳 (MOC) 含量明显低于坡顶, 但上坡三个侵蚀部位的 POC 含量无显著差异 ($p > 0.05$), 说明土壤侵蚀导致表层土壤 MOC 含量明显降低, 但对 POC 影响不大, 三个侵蚀

部位表层 SOC 含量的差异主要是由 MOC 流失所致。沉积部位 (尤其是坡脚) POC 含量和 POC/SOC 较上坡侵蚀部位低, 反之 MOC 含量和 MOC/SOC 较侵蚀部位高, 说明沉积区 MOC 相对累积, 而 POC 发生损耗。上坡侵蚀部位大团聚体含量依次为: 坡肩 < 坡背 < 坡顶, 而微团聚体含量变化趋势相反; 沉积区大团聚体含量较低, 而微团聚体含量相对较高 (表 2)。团聚体结合态有机碳与团聚体含量变化并不一致, 侵蚀部位大团聚体结合态有机碳 (Macro AOC) 和微团聚体结合态有机碳 (Micro AOC) 均随土壤侵蚀速率的增加而减少; 沉积区大团聚体结合态有机碳含量低于坡顶, 而微团聚体结合态有机碳却高于坡肩 (表 2)。

表 2 土壤侵蚀和沉积对表层土壤 (0~20 cm) 不同碳组分的影响¹⁾

Table 2 Effects of soil erosion and deposition on different SOC components in topsoil (0~20 cm)

地形部位 Geomorphic positions	土壤有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	颗粒态 有机碳 POC(mg kg ⁻¹)	矿质结合 态有机碳 MOC(mg kg ⁻¹)	大团聚体 Macroaggregate (g kg ⁻¹)	微团聚体 Microaggregate (g kg ⁻¹)	大团聚体结 合态有机碳 Macro AOC (mg kg ⁻¹)	微团聚体结 合态有机碳 Micro AOC (mg kg ⁻¹)
坡顶 Summit	15.2±0.8 a	4.4±0.6 ab	10.8±1.9 a	348±50 a	652±50 c	5.5±0.9 a	8.9±0.5 a
坡肩 Shoulder slope	11.8±0.5 c	4.8±0.3 a	7.0±0.6 d	255±41 c	745±42 ab	3.7±0.6 c	6.5±0.2 c
坡背 Back slope	14.4±0.6 ab	4.6±0.3 a	9.8±0.6 b	300±33 b	699±33 b	5.3±0.5 a	8.4±0.2 ab
坡脚 Foot slope	12.1±0.9 c	3.7±0.3 c	8.4±0.4 c	218±38 d	782±38 a	3.7±0.5 c	7.5±1.2 b
坡趾 Toe slope	13.8±1.0 b	3.8±0.9 bc	10.1±1.3 ab	299±29 b	701±29 b	4.8±0.6 b	8.1±0.7 ab

1) 表中数据为平均值±标准差。同一列中字母相同表示处理间差异不显著, 字母不同表示处理间差异显著 (LSD 检验) The data in the table are means±standard deviation. Different letters following the values, mean significant differences between them or the other way round (LSD comparison)

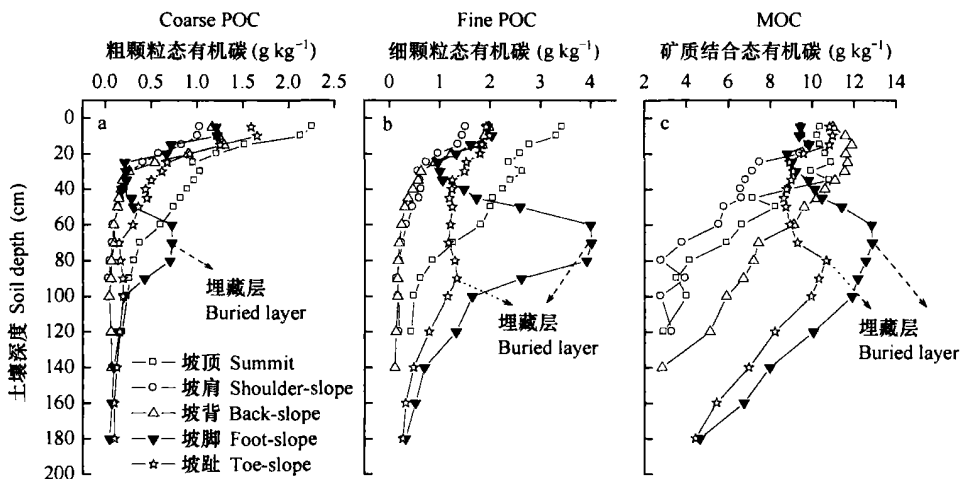


图 1 不同地形部位粗、细颗粒态有机碳和矿质结合态有机碳的深度分布

Fig. 1 Depth distribution of coarse, fine POC and MOC at different geomorphic positions

2.2 典型断面颗粒态有机碳的深度变化

由图1可见,上坡三个侵蚀部位粗、细POC和MOC含量随土壤深度增加呈指数下降,并且表土中三者下降幅度依次降低,反映了表土不同粒级有机碳组分对温度、水分及土壤侵蚀状况有不同程度的响应,并随粒级的增加有机碳矿化损失加剧。坡脚部位三个碳组分与SOC具有相似的深度变化特征^[15],表现出明显的土壤累积和埋藏特征,即先下降到25 cm深度附近,接着迅速增加到埋藏层(70 cm)达到最大值,然后随土壤深度增加下降至剖

面的最小值^[15]。但是,埋藏层土壤粗POC含量明显低于目前耕层(0~20 cm)土壤,而埋藏层细POC和MOC含量却显著高于耕层土壤。坡趾除了粗POC含量无明显的堆积和埋藏特征外,细POC和MOC含量与总SOC含量变化相似,在80 cm深处的埋藏层出现峰值^[15],但埋藏层土壤MOC含量仅为耕层土壤的70.6%。相关分析表明,小粒级的有机碳组分与SOC的相关系数均高大于大粒级,某种程度上说明小粒级的有机碳组分更能准确地反映SOC的侵蚀动态(表3)。

表3 典型剖面SOC与不同粒级土壤物理性有机碳组分之间的相关关系

Table 3 Correlations between SOC and soil physical carbon fractions of different size

有机碳组分 Organic carbon fractions	土壤有机碳 SOC	粗颗粒态 有机碳 Coarse POC	细颗粒态 有机碳 Fine POC	矿质结合 态有机碳 MOC	粗大团聚体结 合态有机碳 Coarse macro AOC	细大团聚体 结合态有机碳 Fine macro AOC	微团聚体结 合态有机碳 Micro AOC
粗颗粒态有机碳 Coarse POC	0.69**	1	0.73**	0.50*	0.75**	0.48*	0.63**
细颗粒态有机碳 Fine POC	0.85**	0.73**	1	0.69**	0.42*	0.72**	0.78**
矿质结合态有机碳 MOC	0.96**	0.50*	0.69**	1	0.50*	0.74**	0.88**
粗大团聚体结合态有机碳 Coarse macro AOC	0.57*	0.75**	0.42*	0.50*	1	0.34*	0.59*
细大团聚体结合态有机碳 Fine macro AOC	0.78**	0.48*	0.72**	0.74**	0.59*	1	0.88**
微团聚体结合态有机碳 Micro AOC	0.92**	0.63**	0.78**	0.88**	0.48*	0.80**	1

* 和** 分别表示 $p < 0.05$ 和 0.01 显著水平 * and ** stands for significance in difference at $p < 0.05$ and 0.01 probability levels, respectively

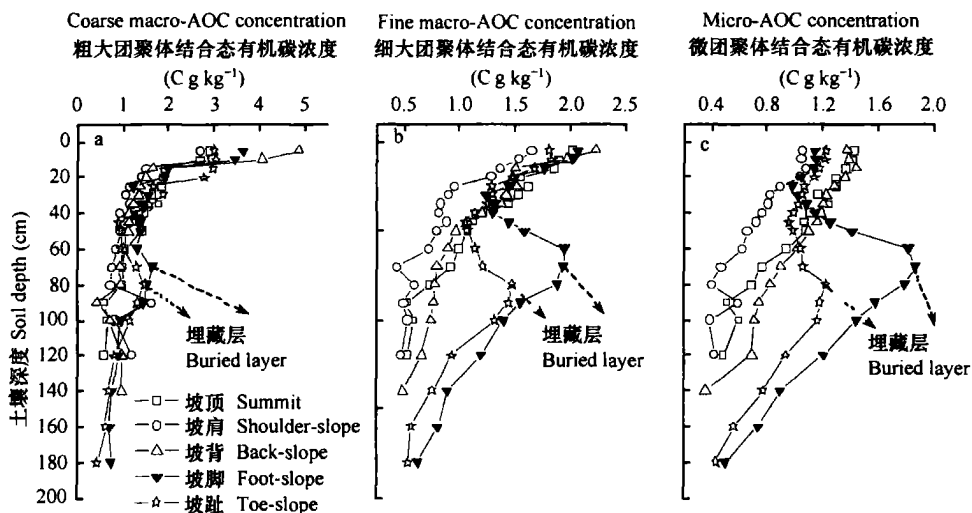


图2 不同地形部位各粒级团聚体结合态碳浓度的深度分布

Fig 2 Depth distribution of concentration of aggregate bound carbon of different sizes at geomorphic positions

2.3 典型断面团聚体结合态有机碳的深度变化

由图 2 可见, 三个侵蚀部位粗、细大团聚体碳浓度和微团聚体碳浓度随土壤深度增加呈指数下降, 并且表层土壤团聚体碳浓度下降幅度随团聚体粒径的减小而降低。坡脚和坡趾部位也表现出明显的土壤堆积和埋藏特征, 其峰值出现的深度与埋藏层深度相吻合, 且团聚体粒径越小其累积趋势越明显。各粒级团聚体结合态有机碳含量明显受该粒级团聚体所占百分比及其碳浓度的影响。由图 3 a 和图 3 b 可见, 三个侵蚀部位粗、细大团聚体结合态有机碳含量在耕层(0~ 20 cm 或 15

cm) 随深度增加而增加, 耕层以下又呈指数下降, 而微团聚体结合态有机碳含量则随土壤深度增加而增加。坡脚部位细大团聚体结合态有机碳含量随土壤深度的增加先下降到 25 cm, 接着迅速增加并在埋藏层处出现峰值(70 cm), 然后又迅速下降至剖面最小值。但是, 坡脚和坡趾部位土壤微团聚体碳含量在埋藏层以下 10~ 20 cm 处出现峰值。另外, 各粒级团聚体碳浓度和碳含量均与 SOC 含量呈显著或极显著正相关, 并且两个粒级的 POC 和大团聚体碳含量之间均呈显著或极显著正相关(表 3)。

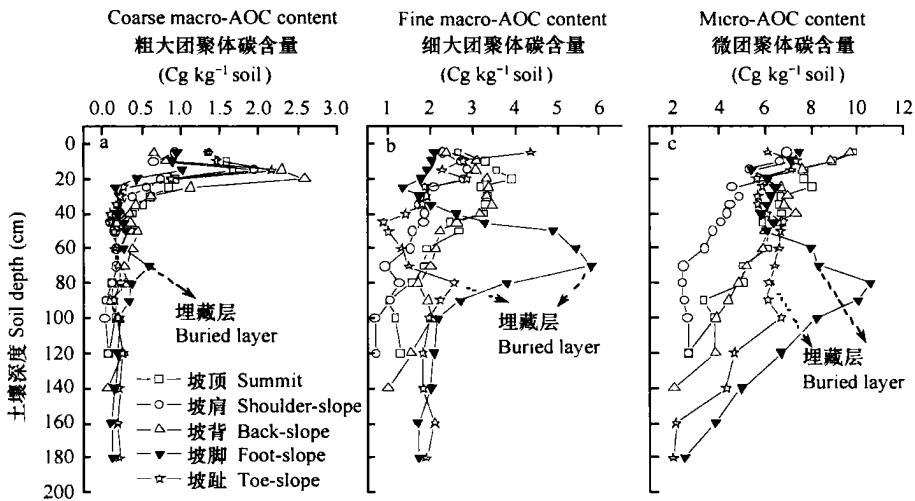


图 3 不同地形部位各粒级团聚体结合态碳含量的深度分布

Fig. 3 Depth distribution of content of aggregate bound carbon of different sizes at geomorphic positions

3 讨论

3.1 土壤侵蚀与不同粒级颗粒态有机碳的关系

上坡三个侵蚀部位表土 POC 含量无显著差异, 而 MOC 含量随土壤侵蚀速率增加而下降。长期处于沉积状态的坡脚, POC、MOC、POC/SOC 和 MOC/SOC 的变化表明沉积区 MOC 累积明显, 而 POC 发生损耗(表 2)。Jacinthé 等^[9] 也发现, 尽管沉积区 SOC 含量高于附近林地对照点, 但累积土壤中活性碳如微生物生物量碳、易矿化碳较基于总碳含量的估计值低 20%~ 46%, 这与本文的研究结果类似。POC 主要来源于新鲜植物残体的输入, 研究区整体上侵蚀并不严重, 且具有较厚的黑土层, 因此土壤侵蚀对植物生产力可能还没有产生明显的影响, 各地形部位植物残体年输入的有机碳量无显著差异。另外,

POC 密度较小($< 1.6 \text{ g cm}^{-3}$), 易被地表水流携带迁移到低洼的沉积区^[1], 每年迁移损失的 POC 为植物残体输入的新碳所补充, 导致上坡侵蚀部位 POC 含量差异不显著。沉积区表层土壤 POC 没有显著累积, 反映了 POC 也是微生物活动的重要基质之一, 迁移和累积过程中易被微生物利用而被分解损失^[3, 16]。实际上, POC 的迁移对下游河流湿地土壤固碳作用更为明显。许多研究者认为侵蚀区植物生长和分解周而复始地进行, 为下游沉积区提供稳定的碳源, 土壤侵蚀—迁移—截留过程较纯粹的土壤碳迁移影响更大^[1, 7, 8]。

MOC 是与土壤粘粒和粉粒结合、性质较稳定的有机碳组分^[17], 易随地表水流迁移且不易被微生物分解, 在沉积区发生大量累积。沉积部位粗、细 POC 和 MOC 含量的深度变化特征反映了侵蚀物质随时间的累积过程(图 1)。由研究区的坡形演变过程可

知, 1954 年以前上坡搬运的土壤物质主要累积在坡脚部位, 1954 年以后累积的土壤逐渐向坡趾过渡, 且主要集中在坡趾部位^[15]。在土壤累积的初期, 坡脚部位坡度较小, 大部分迁移来的 POC 和 MOC 在此累积, 且被地表径流迁移损失的量较小, 因此越接近埋藏层的土壤其 POC 和 MOC 含量越高。由于细颗粒土壤中有有机碳相对富集^[18, 19], 所以先累积土壤较后累积土壤的 MOC 含量高。随着侵蚀的进行, 上坡侵蚀部位土壤 MOC 含量降低, 加上坡脚部位 POC 流失量随时间相应地增加, 导致 POC 和 MOC 含量随之降低。另外, 根据 SOC 的饱和理论, 有机碳首先在细颗粒中累积, 当粘粒含量相对较低、有机质来源丰富、与粘粒结合的有机质量达到饱和时, 有机质开始转向粗颗粒中累积^[19], 所以坡脚埋藏层土壤 MOC 含量要高于两个粒级的 POC (图 1)。坡趾虽然处于沉积区, 但位于集水盆地沟缘的出水口, 在土壤累积初期 (1903 年) 处于侵蚀状态^[15], 所以其埋藏层附近土壤 POC 和 MOC 的累积没有坡脚明显。

3.2 土壤侵蚀与团聚体及其结合态有机碳的关系

土壤侵蚀引起土壤团聚体的消散及破坏。相对于侵蚀微弱的坡顶, 侵蚀严重的坡肩部位表土大团聚体含量减少, 而微团聚体比例增加, 但是大团聚体和微团聚体结合态有机碳含量均显著下降 (表 1)。大量研究表明, 大粒级水稳性团聚体是由次一级团聚体组成, 土壤侵蚀优先使表层土壤水稳性大团聚体遭到破坏, 相应地增加微团聚体的比例^[4, 5, 20]。沉积区大团聚体含量较低, 而微团聚体含量相对较高, 说明微团聚体易被地表水流携带迁移, 在低洼的沉积部位发生累积。由于微团聚体中的有机碳其形成年代较大团聚体中的更老, 且大团聚体中的碳浓度明显高于微团聚体^[21], 因此土壤侵蚀使富碳的大团聚体遭到破坏和贫碳的微团聚体增加, 从而引起 SOC 的流失。土壤因大团聚体 \rightarrow 微团聚体 \rightarrow 粘团 (粘粒微团聚体) \rightarrow 粘粒这一土壤消散过程导致碳释放和被微生物矿化^[1], 侵蚀引起土壤大团聚体转化加快, 可能是造成 SOC 损失的首要原因。另外, 侵蚀部位微团聚体结合态有机碳含量的减少可能与地表水流迁移和下层土壤稀释作用有关。土壤侵蚀剥蚀掉富碳的表土层, 亚表层贫碳土壤通过耕翻作用混合进入耕层, 降低了总 SOC 和微团聚体结合态有机碳的含量。因此, 即使微团聚体的比例有所增加, 但因其浓度降低, 最终导致微团聚体结合态有机碳含量下降。

沉积部位埋藏层附近土壤大团聚体结合态有机

碳含量较高, 反映了侵蚀物质在深埋作用下发生重新团聚作用。相关分析表明, POC 与大团聚体结合态有机碳含量显著正相关, 体现了 POM 是土壤大团聚体形成的核心物质和重要的胶结剂^[13]。在累积初期, 坡脚部位截留了较多的上坡迁移来的 POC, 增加了微生物活性^[16], 而微生物可提供各种暂时性的粘合剂。这种现象近似等同于免耕体系下层土壤具有较高的生物活性, 包括真菌生长、根系和土壤动物的数量, 促进大团聚体内部形成 POM, 增加其结构稳定性^[22, 23]。由于埋藏层土壤细颗粒 (粘粒和粉粒) 有机质存在饱和度, 来源于上坡的侵蚀碳首先引起土壤微团聚体含量变化, 当土壤粘粒和粉粒结合的有机碳达到饱和时, 微团聚体高度稳定^[24]。而后, 额外的侵蚀碳主要形成与砂粒复合的 POM 中, 进而促进了稳定大团聚体的形成^[24], 并最终导致 SOC 的固定。沉积部位土壤微团聚体结合态有机碳含量在埋藏层深处没有出现峰值, 正好反映了微团聚体向大团聚体转移这一过程。值得注意的是, 土壤团聚体解聚-迁移-再形成不是一个简单的物理过程, 而是物理、化学以及生物化学过程的综合体现。

4 结 论

本文从土壤结构着手, 研究表层和典型剖面土壤物理性有机碳的水平 and 垂直分布特征, 探讨土壤侵蚀和沉积作用对 SOC 的损耗和截留机理。主要得出以下几个结论:

- 1) 土壤侵蚀倾向于导致与细颗粒结合的有机碳 (如 MOC 和 Micro AOC) 迁移流失。在侵蚀不严重的黑土区, 侵蚀区表层土壤 POC 的流失被植物残体输入的新碳所补偿。沉积区表层土壤中耐分解的有机碳所占比例较大, 形成一个惰性碳库。
- 2) 土壤侵蚀破坏耕层水稳性大团聚体, 相应地增加微团聚体比例。土壤侵蚀通过加速大团聚体的周转导致 SOC 损耗。微团聚体结合态有机碳的损失主要源自随地表水流的流失和下层土壤的稀释作用。
- 3) 在低洼的沉积部位, 早期迁移来的 POC、MOC 和微团聚体结合态有机碳含量均较高, 并且移出量相对较少。通过深埋作用和重新团聚作用, 促进了大团聚体的形成, 有利于 SOC 累积与稳定。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29: 437 ~ 450

- [2] Six J, Elliott T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1 350~ 1 358
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 2 099~ 2 103
- [4] 郭志民. 土壤侵蚀与恢复重建对土壤性质的影响. *福建水土保持*, 1999, 11(2): 49~ 51. Guo Z M. Effects of soil erosion and reconstruction on soil properties (In Chinese). *Fujian Soil and Water Conservation*, 1999, 11(2): 49~ 51
- [5] Wairiu M, Lal R. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 19~ 27
- [6] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2 176~ 2 183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2 176~ 2 183
- [7] Stalard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 231~ 257
- [8] McCarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 423~ 430
- [9] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Organic carbon storage and dynamics in croplands in croplands and terrestrial deposits as influenced by subsurface tile drainage. *Soil Science*, 2001, 166: 322~ 335
- [10] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 利用燃煤飞灰作为时间标记物评价坡耕地黑土侵蚀物质和有机碳的再分配. *土壤学报*, 2005, 42(1): 16~ 23. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al.* Assessment of redistribution of erosion material and soil organic carbon using fly ash as a time maker at a sloping field in Black soil region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 16~ 23
- [11] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 耕地黑土剖面有机碳的分布和 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究. *土壤学报*, 2005, 42(6): 957~ 964. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al.* Profile distribution of organic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in a black soil at a sloping field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 957~ 964
- [12] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al.* Using ^{137}Cs tracer technique to evaluate soil erosion and deposition of a black soil in Northeast China. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 201~ 209
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777~ 783
- [14] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: Tillage and drop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil & Tillage Research*, 1998, 49: 173~ 183
- [15] Fang H J, Cheng S L, Zhang X P, *et al.* Soil organic carbon redistribution and budget of erosion and deposition in a sloping field. *Land Degradation & Development*, 2006, 17: 89~ 96
- [16] Yakovchenko V P, Sikora L J, Millner P D. Carbon and nitrogen mineralization of added particulate and macroorganic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30(14): 2 139~ 2 146
- [17] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil & Tillage Research*, 2002, 63: 133~ 139
- [18] 黄丽, 丁树文, 董舟, 等. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 8~ 13, 21. Huang L, Ding S W, Dong Z, *et al.* Study on nutrient losses of purple soil in Three Gorges Reservoir Region (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 8~ 13, 21
- [19] Carter M R. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron.*, 2002, 94: 38~ 47
- [20] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 2002, 47: 133~ 149
- [21] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle size fractions of water stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595~ 605
- [22] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79: 7 ~ 31
- [23] 李忠佩, 焦坤, 林心雄, 等. 施肥条件下瘠薄红壤的生物化学性状变化. *土壤*, 2003, 35(4): 304~ 310. Li Z P, Jiao K, Lin X X, *et al.* Effect of fertilizer application on biochemical properties of infertile red soils (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(4): 304~ 310
- [24] Angers D A. Water stable aggregation of Québec silty clay soils: Some factors controlling its dynamics. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47: 91~ 96

EFFECTS OF SOIL EROSION AND DEPOSITION ON LOSS AND ACCUMULATION OF SOIL ORGANIC CARBON IN PHYSICAL FRACTIONS

Fang Hua jun^{1,2} Yang Xueming^{2,3} Zhang Xiaoping² Liang Aizhen² Shen Yan²

(1 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China*)

(3 *Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, Ontario, N0R 1G0, Canada*)

Abstract A typical undulating tract of farmland in the Black Soil region of Northeast China was taken for a case study to analyze impact of soil erosion and deposition on loss, transportation and accumulation of SOC through measuring contents of water stable aggregates of different sizes, particulate organic carbon and aggregate bound organic carbon in surface layers and typical soil profiles in different topographic positions. Results show that water stable macro aggregate, mineral bound organic carbon (MOC) and aggregate bound organic carbon decreased in content with increasing rate of soil erosion at three sampling sites on the upper slope, and the contents of particulate organic carbon (POC) and POC/SOC ratios were lower at the deposition sites, especially in foot-slope, at the erosion sites, while the contents of MOC and MOC/SOC ratios displayed a reverse trend. The depth distribution of organic carbon of various particle size fractions at the foot-slope was characterized by obvious accumulation and deep burying of eroded materials; and accumulation was getting more and more obvious with decrease in particle size of the organic fraction. The above listed findings reflect that soil erosion tends to transport organic carbon associated with fine particles and micro aggregate, and then accumulates in depressed deposition sites. The eroded materials, such as micro aggregates, particulate organic matter (POM) in the buried layer form stable macro aggregates through deep burying, which eventually promotes sequestration of SOC in the deposition sites.

Key words Soil erosion; Water stable aggregate; Particulate organic carbon; Aggregate associated organic carbon; Black soil