

东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布

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, Harrow, Ontario, Canada N0R 1G0)

摘要:以东北黑土区典型漫岗坡耕地为研究对象,测定不同侵蚀程度地形部位表层土壤不同粒级有机碳、水稳性团聚体及其结合碳含量,探讨土壤侵蚀和沉积作用对表层土壤有机碳(SOC)损失、迁移和累积的影响。研究结果表明:与侵蚀微弱的坡顶相比,严重侵蚀的坡肩部位表层土壤水稳性大团聚体、矿质结合碳(IOC)和团聚体结合碳含量分别减少 23%、17.5%和 8.7%,而土壤颗粒有机碳(POC)含量无明显差异。长期处于沉积状态的坡脚部位,表层土壤大团聚体、POC 和大团聚体结合碳含量分别较坡顶低 56.1%、47.9%和 67%;而 IOC 和微团聚体结合碳分别较坡顶高 10%和 18.7%。研究结果反映了土壤侵蚀以及耕作倾向于破坏水稳性大团聚体,其内部包裹的轻质、细颗粒物易被地表水流迁移流失,加上下层土壤的稀释作用,导致侵蚀部位 SOC 减少。轻质活性碳组分在迁移和累积过程中易被微生物利用分解,沉积区土壤以 IOC 和微团聚体碳为主,形成一个惰性碳汇。

关键词:土壤侵蚀;水稳性团聚体;颗粒有机碳;大团聚体碳;黑土

文章编号:1000-0933(2006)09-2847-08 中图分类号:Q14, S153.6, S154.1 文献标识码:A

Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the Black Soil region, Northeast China

FANG Hua-Jun^{1,2}, YANG Xue-Ming^{2,3}, ZHANG Xiao-Ping², LIANG Ai-Zhen², SHEN Yan² (1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China; 3. Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture & Agri-Food Canada, Harrow, Ontario, Canada N0R 1G0). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2847 ~ 2854.

Abstract: A typical rolling farmland in the Black Soil region of Northeast China was selected in a case study to analyze impact of soil erosion and deposition on the loss, transportation and accumulation of soil organic carbon (SOC) in topsoil by measuring particulate organic carbon (POC), composition of water stable aggregates of different sizes and contents of associated carbon in different slope positions. Results showed that the contents of macro-aggregates, incorporated organic carbon (IOC) and micro-aggregate associated carbon at the shoulder-slope with serious erosion were 23%, 17.5% and 8.7% lower than those of summit with weak erosion, respectively, while there was no significant difference in POC among three erosion sites. At foot slope, a long-term soil deposition recipient, the contents of POC, macro-aggregates and macro-aggregate associated carbon were 56.1%, 47.9% and 67% lower than those of summit, while IOC and micro-aggregate associated carbon were 10% and 18.7% higher than those of summit, respectively. The findings suggest that soil erosion and cultivation tend to break down macro-aggregates, whose content light in weight and fine in particle size are hence easily lost and transported with surface water flow, which in addition to the dilution function of subsurface soil leads to decrease in SOC content at erosion sites. Moreover, the fraction of light

基金项目:中国科学院国外杰出人才支持资助项目(K09Z3);国家自然科学基金资助项目(40271108, 40471125)

收稿日期:2005-06-18; **修订日期:**2006-03-01

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

Foundation item: The project was supported by outstanding talents abroad of CAS (No. K09Z3) and National Natural Science Foundation of China (No. 40271108, 40471125)

Received date: 2005-06-18; **Accepted date:** 2006-03-01

Biography: FANG Hua-Jun, Ph. D., mainly engaged in soil erosion and soil organic carbon. E-mail: huajunfang@yahoo.com.cn

labile organic carbon is apt to be exploited and decomposed by soil microbes in the process of transportation and accumulation. As a result, SOC in the depositional sites was dominated by IOC and micro-aggregate associated carbon, forming a big passive carbon pool in the topsoil.

Key words: soil erosion; water stable aggregate; particulate organic carbon (POC); macro-aggregate associated carbon; black soil

土壤有机碳库 (SOC pool) 是由不同周转周期的有机碳组分构成, 根据其平均驻留时间 (MRT) 大致可分为活性 (active)、缓性 (slow) 和惰性 (passive) 碳组分^[1]。土壤活性有机碳相对于总 SOC 来说, 对土地利用方式和土壤管理措施反应更为敏感, 常被用于表征土壤有机质早期变化。目前国内多采用化学和物理方法分离出土壤活性有机碳如易氧化碳、微生物生物量碳、轻组有机碳等^[2~4], 这一方法得出的活性有机质组分并不能包括土壤中大部分半分解和未分解的有机物质, 而这一部分有机质性质非常不稳定, 对土壤管理措施反应敏感。目前国内有些研究者开始从土壤结构着手, 探索土壤管理方式 (耕作、施肥等) 对团聚体碳和颗粒碳的影响, 结合稳定性同位素方法论述了 SOC 损耗与累积的机制^[5~8], 但有关土壤侵蚀对团聚体碳和颗粒碳的影响和 SOC 动态机理研究还鲜有报道。彭新华等^[5]模拟自然条件下土壤团聚体破碎机制, 研究不同恢复植被下团聚体稳定性的变化以及土壤有机碳的积累与团聚体稳定性的关系, 得出快速湿润是团聚体破碎的主要机制。苏永中等^[6]测定了科尔沁沙地不同沙化程度农田 0~15cm 耕层土壤颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 含量, 揭示农田沙漠化过程中土壤有机碳的衰减机理。但是关于土壤侵蚀对土壤 POC 和团聚体结合有机碳影响的研究还不多见。本文主要研究目的: 通过测定不同侵蚀程度的地形部位表层及亚表层不同粒级土壤有机碳、团聚体及其结合碳含量, 探讨土壤侵蚀对不同 SOC 组分的影响, 研究 SOC 组分的迁移及累积特征。

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沐石河小流域 (N: 44°43.0', E: 125°51.6'), 距离吉林省德惠市松花江镇西南 5km。处于中温带半湿润气候区, 年均气温 4.4℃, 年均降水 533.7 mm, 主要集中在 6~8 月份, 约占全年降水总量的 70% 以上。采样区位于集水盆地北坡, 地形为黑土区典型漫岗台地, 坡长为 253 m, 最大相对高程为 11.68 m。沿坡建立 3 个地形断面 (transect), 每个断面相距 25m, 在每个断面上划分坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡趾等 5 个典型地形部位。各地形部位分别距离顶脊 28 m, 43 m, 118 m, 213 m 和 253 m^[7]。土壤属于典型黑土亚类中的中层黑土, 各地形部位土壤侵蚀状况及部分土壤属性如表 1 所示。采样区土地利用方式为农田, 长期以来玉米连作, 顺向打垄和耕翻一直是该区的主要土壤管理方式。

表 1 研究区各地形部位表层土壤 (0~20cm) 属性^[9]

Table 1 Soil properties (0~20cm) at different slope positions in study area^[9]

地形部位 Slope positions	坡度 (°) Slope gradient	土壤侵蚀速率 (t hm ⁻² a ⁻¹) Rate of soil erosion	土壤有机碳 SOC (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	pH (soil/water = 1/5)	土壤水分 (%) Soil moisture	粉粒 Silt (%)	粘粒 Clay (%)
坡顶 Summit	2.6 ±1.1	11.4 ±9.54	13.5 ±0.23	1.01 ±0.21	5.91 ±0.31	20.2 ±1.19	35.2 ±3.01	22.7 ±4.30
坡肩 Shoulder-slope	3.5 ±0.6	38.4 ±21.3	12.5 ±0.42	1.06 ±0.31	5.92 ±0.26	19.1 ±1.24	33.8 ±3.4	21.2 ±6.59
坡背 Back-slope	2.2 ±0.6	23.4 ±10.1	14.1 ±0.96	0.96 ±0.23	6.12 ±0.39	20.2 ±0.7	41.6 ±8.29	22.8 ±3.58
坡脚 Foot-slope	1.2 ±0.7	-10.6 ±16.0	11.8 ±0.43	1.09 ±0.12	5.87 ±0.27	19.0 ±0.73	41.2 ±5.48	19.7 ±2.1
坡趾 Toe-slope	1.1 ±0.9	-35.3 ±61.5	14.3 ±1.2	1.09 ±0.29	5.66 ±0.16	18.5 ±0.91	36.4 ±2.59	23.4 ±3.67

表中数据为平均值 ±标准差 Data in the table are mean ±SD 正值代表侵蚀, 负值代表沉积 Positive value means erosion and negative value means deposition

1.2 样品采集与分析

土样采于 2002 年 10 月。用直径为 5cm 的取土钻取出完整的土芯, 将土芯分为 0~20cm 和 20~30cm, 分别代表表层和亚表层土壤。在每个地形部位用多点 (n=3~5) 均匀混合样来表征该地形部位土壤。土样在

田间湿度下过 7mm 筛,在自然状态下风干,供测试分析用。

土壤 POC 按照 Cambardella 和 Elliott^[10]提供的方法测定。将风干土过 2mm 筛,去除肉眼可见的植物根系等杂物。50℃ 烘干一夜,保存在 4℃ 下。称取 10g 预处理土样,放入塑料瓶中,加入 30ml 5g L⁻¹的六偏磷酸钠(hexametaphosphate)溶液,在往复式振荡器上振荡 15h,分散。分散溶液置于 53μm 筛上,用清水冲洗直至沥滤液澄清。再将筛上保留物组分分离出 >250μm 和 53~250μm 两个组分,前者为粗颗粒有机碳(Coarse POC),后者为细颗粒有机碳(Fine POC),矿质结合有机碳(incorporated organic carbon, IOC, <53 μm)用差值法求得。将分离出的各组分在 60℃ 下烘干称重,计算其所占土壤的百分比。

土壤水稳性团聚体参考 Yang 和 Wander^[11]提供的方法测定。称取 25g 风干土样,放入水稳性团聚体分析仪筛上(上下振幅为 30mm,频率为 30 次/min),浸润 10min 后,湿筛 2min。收集残留在 1000μm、250μm 和 53μm 筛上的土壤颗粒,烘干称重,计算各粒级水稳性团聚体的质量分数。其中 >250μm 粒级的团聚体称为水稳性大团聚体(Macro-aggregate),而 <250μm 粒级的团聚体为水稳性微团聚体(Micro-aggregate)。然后,将分离的各粒级土壤颗粒和团聚体磨碎过 100 目筛,用元素分析仪(ThermoFinnigan, Italy)测定其碳含量,乘以各自所占土壤的百分比得出各颗粒碳和团聚体碳含量。因本研究供试黑土不含碳酸盐,所以总碳即为总 SOC。

1.3 数据统计分析

利用 SAS 统计软件对数据进行单因素方差分析,用 Fisher 最小显著性检验进行均值间的比较分析。数据用 Origin 数学软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体的空间分布

由图 1-a 和图 1-b 可见,各地形部位表层(0~20cm)土壤 >1000μm 水稳性团聚体含量一般小于 8%,亚表层(20~30cm)土壤该粒级团聚体含量均低于表层。表层土壤 250~1000μm 团聚体含量变化范围为 17.0%~27.9%,但亚表层土壤该粒级团聚体含量均高于表层。上坡 3 个侵蚀部位,表层土壤 2 个粒级的大团聚体均表现为坡肩小于坡背和坡顶。并且,坡肩与坡顶 >1000μm 的团聚体含量差异显著($p < 0.05$),而 250~1000μm 团聚体含量差异不显著($p > 0.05$)。

长期处于土壤累积状态的坡脚,两个粒级的大团聚体均显著低于坡顶对照点,除坡脚外,各地形部位 250~1000μm 团聚体含量均无显著差异。表层 >250μm 的大团聚体含量一般低于 35%,其含量的变化趋势和前两个粒级团聚体一致(图 1-c)。坡肩和坡脚表层土壤微团聚体含量显著高于坡顶和坡背,亚表层除坡背外,各部位微团聚体含量均无显著性差异($p > 0.05$)(图 1-d)。表层土壤 53~250μm 的微团聚体含量变化范围为 55%~66%,约占总微团聚体含量的 75%以上,亚表层更高。

2.2 土壤颗粒有机碳的空间分布

土壤 POC 是与土壤砂粒组分结合的那部分有机碳,通常由未分解或半分解的动植物和根系残体组成,其周转期在 5~20a,介于活性和惰性碳之间的一种缓性碳组分^[10]。而 IOC 属于惰性碳组分^[10]。POC 可分为 Coarse POC 和 Fine POC。由图 2-a 和图 2-b 可知,上坡 3 个侵蚀部位,表层土壤 Coarse POC 和 Fine POC 含量无显著性差异($p > 0.05$)。坡脚部位表层土壤 Coarse POC 显著低于坡顶, Fine POC 含量也明显低于坡背($p < 0.05$)。

亚表层土壤 Coarse 和 Fine POC 含量均显著低于表层。由图 2-c 和表 1 可知,各部位表层土壤 POC 含量占总 SOC 含量的 27.8%~58.2%。许多研究表明,表层土壤 POC 含量一般占土壤总碳的 10%以上^[12,13],可高达 30%至 85%^[14]。POC 含量主要集中于表层,亚表层含量极低,一般低于总 SOC 含量的 20%。由图 2-d 可见,上坡侵蚀部位,坡肩 IOC 含量显著低于坡背,沉积部位也比上坡含量低,尤其在坡趾。

2.3 团聚体结合碳的空间分布

大团聚体结合态是相对不稳定的活性碳组分,而微团聚体碳属于形成年代较老,性质稳定的惰性碳组分^[15~17]。由图 3-a 和图 3-b 可知,上坡侵蚀部位,坡顶和坡肩表层土壤 >1000μm 的团聚体碳含量显著低于坡

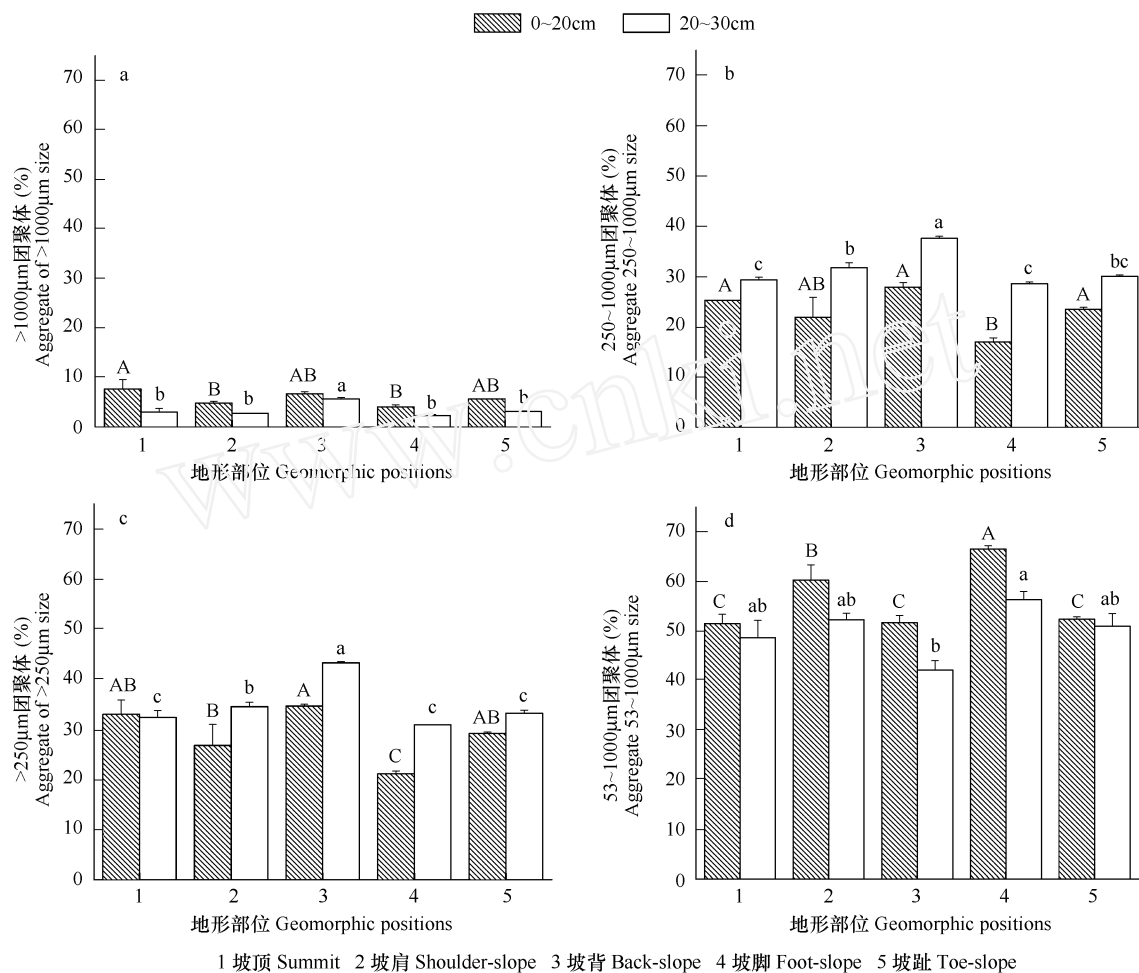


图1 表层和亚表层各粒级水稳性团聚体比例构成

Fig. 1 Compositions of water stable aggregates of different sizes in surface and subsurface soils

背 ($p < 0.05$), 两个沉积部位也比坡背低, 尤其是坡脚。表层土壤该粒级的团聚体碳含量不超过总碳含量的 14%。亚表层土壤 $> 1000\mu\text{m}$ 的团聚体碳含量低于表层。表层土壤 $250 \sim 1000\mu\text{m}$ 团聚体碳与 $> 1000\mu\text{m}$ 团聚体碳变化趋势相似, 并且各地形部位间前者差异更为明显。 $250 \sim 1000\mu\text{m}$ 团聚体碳含量一般占总 SOC 含量的 21%~33%。除坡肩外, 亚表层土壤高于表层。大团聚体碳 (Macro-aggregate carbon, $> 250\mu\text{m}$) 变化范围为 $2.86 \sim 5.09 \text{ g kg}^{-1}$, 占总 SOC 含量的 26.8%~43.2% (图 3-c 和表 1)。表层和亚表层土壤 $53 \sim 250\mu\text{m}$ 粒级的微团聚体碳含量均为坡脚最高, 坡肩最低, 并且亚表层低于表层 (图 3-d)。

3 讨论

3.1 土壤侵蚀与水稳性团聚体

遭受严重侵蚀的坡肩部位, 表层土壤两个粒级的水稳性大团聚体含量明显减少, 而微团聚体含量显著高于坡顶和坡背 (图 1), 表明土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大团聚体, 相应地增加微团聚体含量。因为大粒级团聚体是由次一级团聚体组成, 土壤由结构体 → 大团聚体 → 微团聚体 → 粘团 (粘粒微团聚体) → 粘粒这一转化过程称为消散作用 (Slaking)。Barthes 等^[18]对模拟降雨条件下微型小区和自然降雨条件下径流小区的观测结果表明, 其径流深和侵蚀量与表层土壤的稳定性大团聚体 ($> 200\mu\text{m}$) 含量呈负相关。郭志民等^[19]研究也发现随着土壤侵蚀程度的加剧, $> 250\mu\text{m}$ 的团聚体有减少趋势, 特别是 $> 2\text{mm}$ 的团聚体减少更为明显, 而 $20 \sim 250\mu\text{m}$ 的团聚体却有增加趋势。由于黑土质地粘细, 土壤侵蚀破坏主要体现在 $> 1000\mu\text{m}$ 的大团聚体, 导致上坡侵蚀部位 $250 \sim 1000\mu\text{m}$ 粒级的团聚体含量差异不显著。

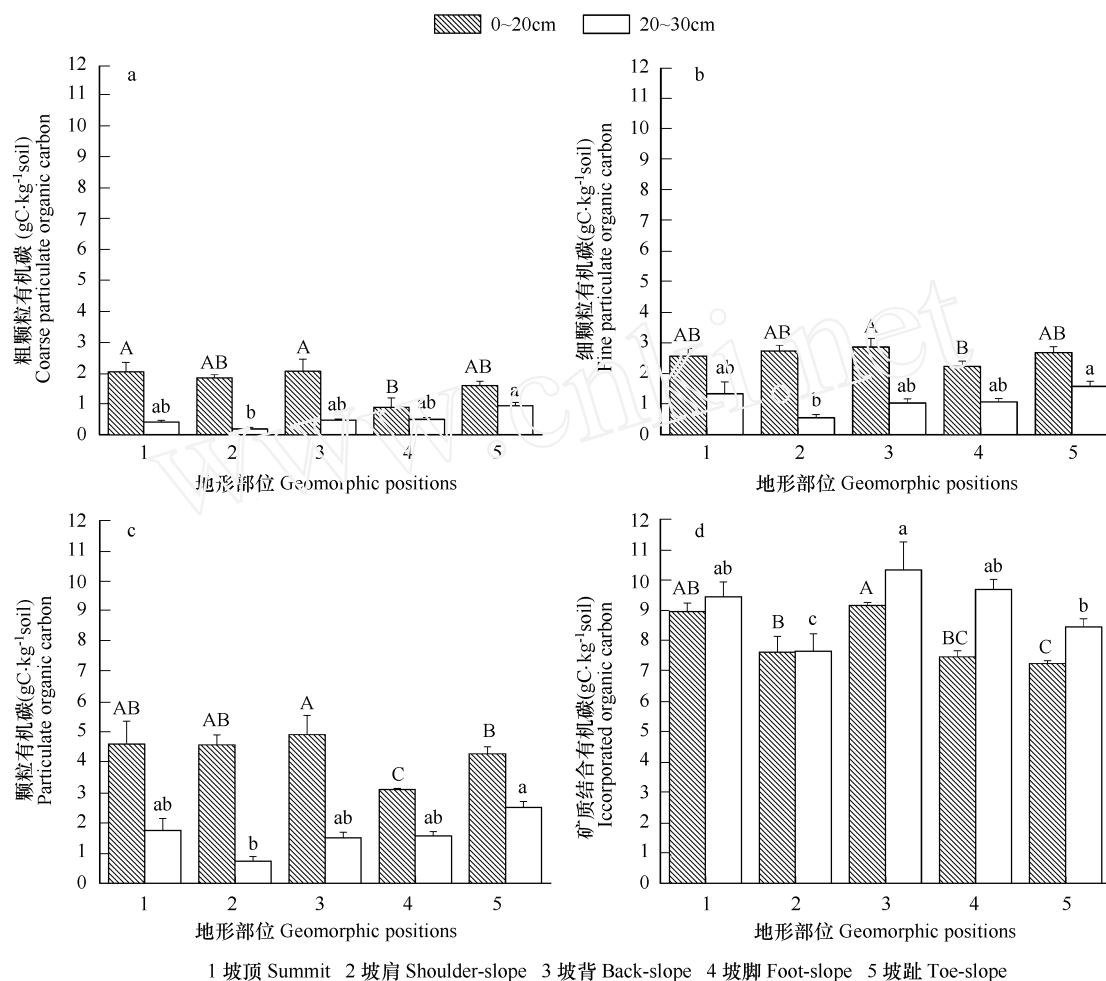


图2 表层和亚表层土壤 POM 和 IOC

Fig.2 POM and IOC in surface and subsurface soils

土壤累积明显的坡脚部位表层土壤两个粒级的大团聚体含量均较低,而微团聚体含量较高(图1),表明土壤侵蚀破坏上坡侵蚀部位的大团聚体,产生更小的可移动颗粒,并沿坡向下迁移。黄满湘等^[20]等研究指出,与原土壤的团聚体组成相比,侵蚀泥沙中 $>1000\mu\text{m}$ 的团聚体含量明显低于原土, $<250\mu\text{m}$ 的团聚体含量要高于原土,说明径流泥沙的流失主要以粒径为 $250\mu\text{m}$ 以下的团聚体为主。这是因为大粒径土壤团聚体是不稳定的,在雨滴打击下,被剥离形成较细的团聚体,当降水强度较小或降水后期,地表径流汇集量小,没有足够的能量搬运大粒径团聚体^[21],导致侵蚀泥沙中细粒径团聚体所占的比重大。坡趾由于微地形的差异,受到由西向东水流的影响,细颗粒水稳性团聚体流失要高于坡脚,相应地 $>1000\mu\text{m}$ 的大团聚体比例也较坡脚高。

3.2 土壤侵蚀与颗粒有机碳

土壤侵蚀产生的消散及分散作用使水稳性大团聚体破碎,暴露出原来受大团聚体保护的 POC。一方面,POC 暴露于微生物作用下分解矿化损失,另一方面,由于 POC 密度较小($<1.6\text{ g cm}^{-3}$),易随地表径流迁移而流失。但是,上坡 3 个侵蚀部位表层土壤两个粒级的 POC 含量无显著性差异(图 2)。可能是因为:研究区坡度较小,土壤侵蚀并不严重,并且有较厚的黑土层,土壤侵蚀对植物生产力可能没有产生明显的影响。因此,各地形部位植物残体年输入的有机碳量大致相当,每年迁移损失的 POC 为植物残体输入新碳所补充,导致上坡侵蚀部位 POC 含量差异不显著。

沉积区表层土壤 POC 并没有出现明显的累积,尤其是坡脚部位含量更低(图 2)。可能有以下几个方面的

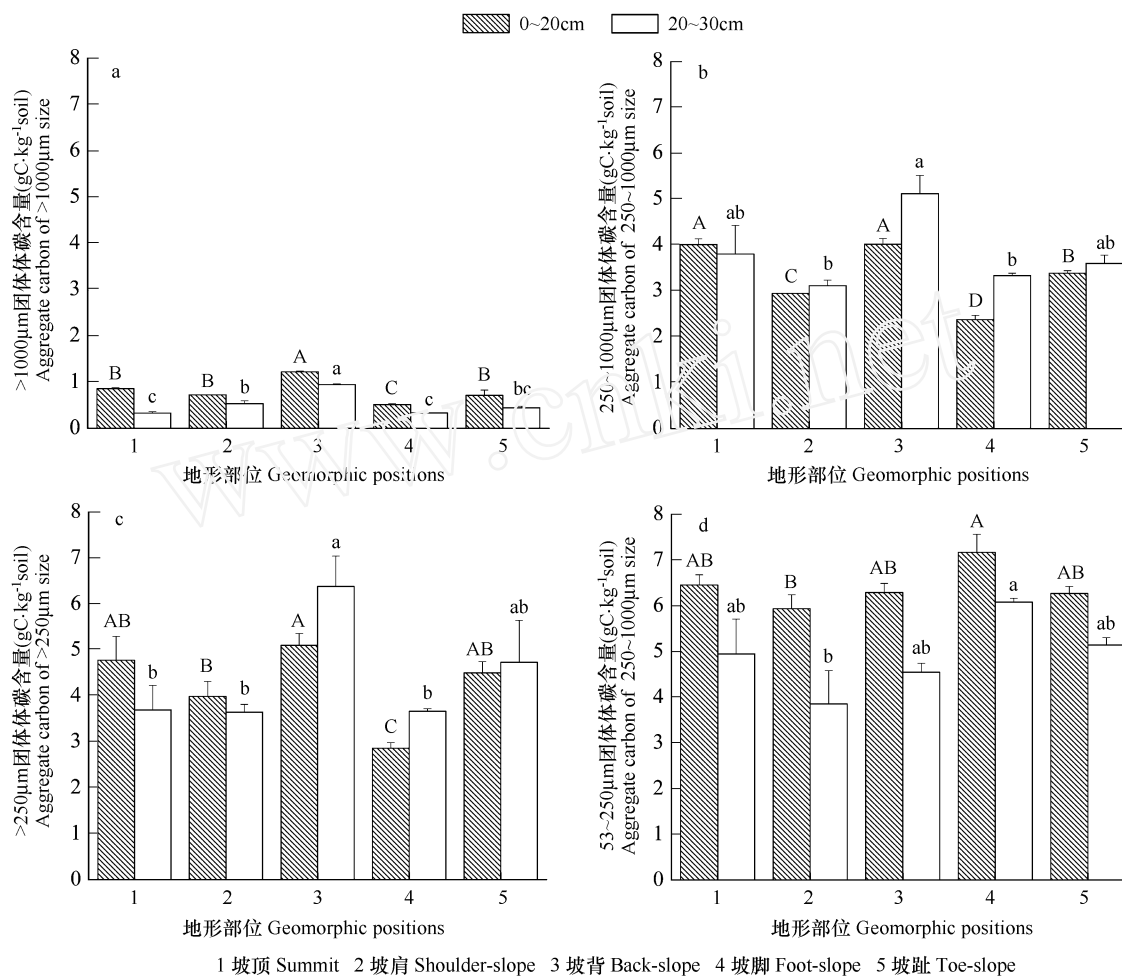


图3 表层和亚表层不同粒级的团聚体结合碳

Fig. 3 Aggregate-associated carbon in surface and subsurface soils

原因: POM 易随地表径流流失,进入下游河流生态系统中,成为河流湿地生态系统有机碳的重要组成部分^[21]。这可能与坡形的演变有关。根据方华军等^[22]的研究结果,从 1964 年后,侵蚀物质由坡脚向坡趾转移,导致坡趾部位 POC 略高于坡脚。POM 性质不稳定,易被微生物利用,发生矿化分解,导致沉积区微生物生物量碳含量较高^[23]。另外,可能与土壤采样时间有关。土壤采样发生在 2002 年 11 月,不是作物的生长期,经历了长时间的分解利用。另外,在严重侵蚀的坡肩部位,IOC 含量明显低于坡顶和坡背(图 2)。因为 IOC 是与土壤粘粒和粉粒复合的、性质稳定的老有机碳,易被地表水流携带流失,并在沉积区大量累积。同时,侵蚀部位表层富碳的 IOC 流失后,下层贫碳的 IOC 补充表层产生稀释作用,降低表层 IOC 含量。

3.3 土壤侵蚀与团聚体结合有机碳

侵蚀部位两个粒级的水稳性大团聚体结合碳含量均较低,表明土壤侵蚀以及耕翻作用明显降低大团聚体结合碳含量,尤其对 >1000μm 团聚体碳的影响更为显著(图 3)。许多研究表明,POC 与大团聚体碳显著相关^[15,24],说明大团聚体(>250μm)是微团聚体与有机物等胶结剂胶结形成,含有许多初期不稳定的新成有机物如 POM、轻组碳及微生物量碳等,而易于被微生物利用发生矿化分解。但由于新碳先进入大团聚体,使大团聚体碳含量增加,然后向微团聚体转移并最终累积在微团聚体中,所以单纯的大团聚体碳含量减少并不能解释耕作等土壤扰动造成的总碳损失。由此,Six 等^[16,17]认为,耕作加快土壤团聚体周转,是导致 SOC 损失的首要原因。坡肩部位表层土壤微团聚体含量也较低,说明土壤侵蚀也明显导致微团聚体碳含量减少,微团聚体碳的迁移流失可能是侵蚀部位 SOC 下降的主要机制。研究表明,土壤细颗粒中 SOC 相对富集,侵蚀剥蚀了

富碳的细颗粒物质,下层贫碳的细颗粒物质通过耕翻作用混入耕层进行补充(图 2 和图 3),进而降低了微团聚体结合有机碳的含量。在有明显土壤累积的坡脚部位, $>1000\mu\text{m}$ 和 $250\sim1000\mu\text{m}$ 两个粒级的团聚体碳在 5 个地形部位中最低,而微团聚体碳含量最高(图 3),表明坡脚表层土壤来自坡上侵蚀部位,明显截留了富含更细小的微团聚体。坡趾部位微团聚体碳含量明显低于坡脚,主要受不同方向的水流迁移损失所引起。

4 结论

土壤侵蚀以及耕作倾向于破坏水稳性大团聚体,相应地增加水稳性微团聚体的比例。地表水流迁移的主要是 $<250\mu\text{m}$ 的微团聚体,并在低洼的沉积部位累积。大团聚体破坏后,包裹在大团聚体内的轻质活性碳(如 POC)以及细颗粒结合的情性碳(IOC 和微团聚体碳)随地表水流沿坡迁移。而 POC 等活性碳是微生物活动的主要碳源,迁移和累积过程中易被微生物利用分解,在沉积区难以累积。活性碳一经矿化,剩下的微团聚体碳受到物理保护,不易被微生物利用,在沉积区表层土壤形成一个情性碳汇。

References:

- [1] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173 ~ 1179.
- [2] Shen H, Cao Z H, Xu Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2): 166 ~ 173.
- [3] Li D P, Wu Z J, Chen L J. Response of Soil Biological Activity to Organic Manure. *Soil Enzyme Activity. Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 463 ~ 468.
- [4] Yang G R, Zhang W J, Tong C L, *et al.* Effects of temperature on the mineralization of organic carbon in sediment of wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 243 ~ 248.
- [5] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176 ~ 2183.
- [6] Su Y Z, Zhao H L. Losses of Soil Organic Carbon and Nitrogen and Their Mechanisms in the Desertification Process of Sandy Farmlands in Horqin Sandy Land. *Scientia Agricultural Sinica*, 2003, 36(8): 928 ~ 934.
- [7] Li L Q, Pan G X, Zhang X H, *et al.* Stable isotopic composition of organic carbon in soil aggregates. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(1): 114 ~ 116.
- [8] Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1491 ~ 1494.
- [9] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al.* Study on soil erosion and deposition of black soils on a sloping cultivated land Using ^{137}Cs tracer method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 141 ~ 147.
- [10] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 777 ~ 783.
- [11] 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.
- [12] Carter M R, Angers D A, Kunelius H T. Soil structural form and stability, and organic matter under cool-season perennial grasses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 1194 ~ 1199.
- [13] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74: 367 ~ 385.
- [14] Cambardella C A, Gajda A M, Doran J W, *et al.* Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* eds. *Assessment methods for soil carbon*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. 349 ~ 359.
- [15] 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: 2099 ~ 2013.
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1367 ~ 1377.
- [17] Six J, Elliott T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 1350 ~ 1358.

- [18] 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.
- [19] Guo Z M. Effects of soil erosion and reconstruction on soil properties. *Fujian Soil And Water Conservation*, 1999, 11(2): 49 ~ 51.
- [20] Huang M X, Zhang S, Yan W J. Sediment enrichment mechanisms of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall conditions. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 306 ~ 310.
- [21] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29: 437 ~ 450.
- [22] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al.* Soil organic carbon redistribution and budget of erosion and deposition in a sloping field. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, 19(3): 202 ~ 207.
- [23] 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): 2139 ~ 2146.
- [24] Angers D A, Carter M R. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1996. 193 ~ 211.

参考文献:

- [2] 沈宏,曹志洪,徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166 ~ 173.
- [3] 李东坡,武志杰,陈利军. 土壤生物学活性对施入有机肥料的响应. 土壤酶活性的响应. *土壤通报*, 2003, 34(5): 463 ~ 468.
- [4] 杨钙仁,张文菊,童成立,等. 温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响. *生态学报*, 2005, 25(2): 243 ~ 248.
- [5] 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): 2176 ~ 2183.
- [6] 苏永中,赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 928 ~ 934.
- [7] 李恋卿,潘根兴,张旭辉,等. 土壤团聚体有机碳稳定性同位素组成. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1): 114 ~ 116.
- [8] 史奕,陈欣,沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1491 ~ 1494.
- [9] 方华军,杨学明,张晓平,等. ^{137}Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征. *生态学报*, 2005, 25(6): 141 ~ 147.
- [18] 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.
- [19] 黄满湘,章申,晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理. *土壤学报*, 2003, 40(2): 306 ~ 310.
- [22] 方华军,杨学明,张晓平,等. 坡耕地黑土有机碳时空分布特征及其迁移累积平衡. *核农学报*, 2005, 19(3): 202 ~ 207.