

侵蚀—沉积连续地形中土壤碳库的空间分异

刘兆云, 章明奎

(浙江大学 环境与资源学院 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 浙江 杭州 310029)

摘要: 侵蚀和再沉积过程可导致土壤碳库在空间上重新分布, 但至今对这一过程中不同碳库的迁移和再分布特点还了解不多。在浙江省亚热带地区选择了由严重侵蚀区—轻微侵蚀区—坡脚堆积区—坡底堆积区组成的侵蚀—沉积系列连续地形, 分别采集了 4 个代表性土壤剖面, 研究了不同地形部位土壤碳库的分异特征, 探讨了侵蚀—再沉积过程中各种碳库的转归。结果表明, 土壤有机总碳及各组分碳均是: 严重侵蚀区 < 轻微侵蚀区 < 坡脚堆积区 < 坡底堆积区。侵蚀区土壤总有机碳自上而下明显下降, 而堆积区土壤有机碳库分布较深, 垂直变化相对平缓。黑碳极易随地表径流发生迁移, 呈由高处逐渐向低处明显富集的趋势。堆积区为连续地形中的碳汇。

关键词: 侵蚀—沉积连续地形; 颗粒态有机碳; 黑碳; 迁移; 空间分异

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)03—0061—05

中图分类号: S714, S153.6

Spatial Variation of Soil Organic Carbon Pools in Erosion-deposition Continuation Landform

LIU Zhao-yun, ZHANG Ming-kui

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, and College of Natural Resources and Environmental Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China)

Abstract: Soil erosion and re-deposition may result in redistribution of soil carbon in terrestrial systems. However, limited information is available about transfer and redistribution characteristics of various soil organic C in the processes of the erosion and re-deposition. A representative erosion-deposition landform, consisting of strongly eroded zone, slightly eroded zone, slope depositional zone, and bottom depositional zone, was selected to sample four soil profiles for studying the spatial variation of various organic carbon pools in different landform positions and exploring fate of various organic C in the processes of soil erosion-deposition. Results showed that intrinsic characteristics of various organic C greatly affected their transfer and distribution behaviors. Contents of total soil organic C and its components increased in the ascendant order of strongly eroded zone, slightly eroded zone, slope depositional zone, and bottom depositional zone. Total organic C content of soil profiles in the eroded zones decreased significantly along with sampling depth, meanwhile those in depositional areas kept relatively high organic C in all sampling depths, even at the deep layer. Black C is the most mobile form of soil organic C and it tended to be accumulated in the soils in bottom depositional zone of the continuation landform. Because of being buried or physically protected from decomposition in the depositional zones, organic C in the zones was C sink.

Keywords: erosion-deposition continuation landform; particulate organic C; black C; transfer; spatial variation

土壤侵蚀可导致物质的迁移, 形成剥蚀区和沉积区。其中, 剥蚀区发生了破坏性过程, 引起土壤结构退化、土壤物质损失; 而在沉积区, 土壤物质却不断积累, 土壤肥力得以更新^[1-2]。在侵蚀—再沉积过程中, 土壤碳库及其组成也可发生一系列的变化。在以往

的研究中, 人们较多地关注侵蚀区土壤碳的损失, 对沉积区土壤碳素的变化(固碳作用), 特别是侵蚀区与沉积区土壤碳库平衡关系的关注不多^[3-5], 这在一定程度上影响了地表过程中碳通量的准确估算, 并在一定程度上夸大了侵蚀过程中土壤碳的损失。目前, 对

土壤侵蚀过程及其土壤有机碳的动态研究已有较多的报道^[3,6-8],但对土壤侵蚀以及随后的再沉积过程对土壤有机碳平衡影响的研究很少^[9-10]。本文以浙江省亚热带地区泥页岩低丘为例,研究了一个由严重侵蚀区—轻微侵蚀区—坡脚堆积区—坡底堆积区组成的侵蚀—沉积连续地形中不同碳库的空间分异特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

研究区位于浙江省绍兴县西部,气候属中、北亚热带季风气候过渡地带,年平均气温为 16.5℃,年均降雨量在 1 500 mm 左右,降雨主要集中在 4—10 月,可导致明显的土壤冲刷和淤积。研究选择了一由泥页岩形成的,具明显侵蚀、再沉积特征的低丘,丘顶与丘底相对高差约 35 m。根据地面坡度、坡积物厚度及地表状况等特征,可把研究的坡面分为严重侵蚀区、轻微侵蚀区、坡脚堆积区和坡底堆积区等 4 个区块。严重侵蚀区坡度在 28°~35° 之间,地表有明显的侵蚀沟,无坡积物覆盖;轻微侵蚀区坡度在 9°~4° 之间,无坡积物覆盖,具片蚀特征;坡脚堆积区坡度在 2°~5° 之间,坡积物厚度在 25~75 cm 之间;坡底堆积区坡度在 0°~3° 之间,坡积物厚度在 100 cm 以上,位于坡面的最低端;严重侵蚀区、轻微侵蚀区和坡脚堆积区的植被为马尾松林(树龄为 25~35 a,覆盖度约分别为 55%、75%和 90%),林下有少量铁芒萁生长;坡脚堆积区的植被为灌木草丛,主要由映山红、乌饭树、芒、铁芒萁、蕨、刺芒野古草组成,映山红和乌饭树的覆盖度约 10%,杂草的覆盖度约 80%。分别在以上 4 个区块的中间部位设点采集代表性剖面,以 15 cm 间隔采集土样,采集至 105 cm 或基岩。剖面位置分布如图 1 所示。

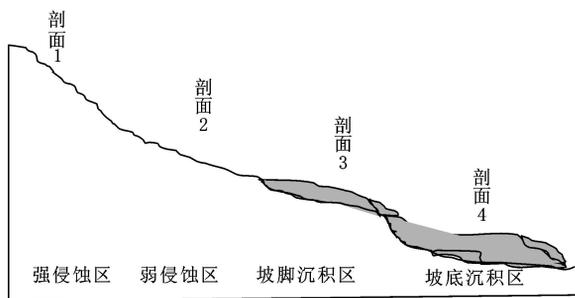


图 1 采样剖面点示意图

1.2 分析项目及方法

土样经室温风干、充分混匀后,分为 2 部分:一部分测定颗粒组成,用 2 mm 土筛筛分出砾石(>2 mm)并用称重法计重;<2 mm 部分用比重计法测

定颗粒组成^[11]。另一部分直接磨细后(不除去 >2 mm 部分)分别过 2 mm 和 0.125 mm 土筛,贮于玻璃瓶中,用于测定有机碳。土壤有机质采用过 0.125 mm 筛土样,用重铬酸钾外加热法测定^[11];颗粒态有机碳(POC)指粒径大于 53 μm 的土壤有机碳,用 5 g/L 焦磷酸钠溶液振荡分散 2 mm 土样,然后过 53 μm 土筛分离获得^[12]。再将 POC 用筛分法分为 >250 μm 和 <250 μm 等 2 部分(分别称为粗颗粒态有机碳和细颗粒态有机碳),烘干后磨细过 0.125 mm 土筛,用重铬酸钾外加热法测定碳。颗粒态有机碳以外的有机碳主要是与粉粒、黏粒结合的碳。因此,本文把土壤有机总碳与颗粒态有机碳的差值称为矿物结合态碳。黑碳指土壤用 0.1 mol/L 重铬酸钾 + 2 mol/L H₂SO₄ 在 55℃ 下氧化 60 h 后残余的碳^[13],用总碳与以上可氧化的碳量差值计算。测定方法简述如下:称 2 份各约 0.5 g 左右过 0.125 mm 筛土样分别置于硬质试管中,加入 0.1 mol/L 重铬酸钾 + 2 mol/L H₂SO₄ 混合液 25 mL,在 55℃ 水浴中加热 60 h,用标准硫酸亚铁滴定法测定残余的重铬酸量,计算被氧化的有机碳量;有机碳总量与以上被 0.1 mol/L 重铬酸钾 + 2 mol/L H₂SO₄ 氧化碳的差值即为黑碳含量。水溶性碳用去离子水提取(土水比 2:1,25℃ 下提取 30 min),提取液经离心后用 0.45 μm 滤膜抽滤,用 TOC 分析仪测定水溶性有机碳。微生物生物量碳采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 提取法提取,测定前提取液冷藏于 4℃ 的冰箱中,用 TOC 分析仪测定有机碳。土壤容重在田间用容重圈法测定^[11]。

2 结果与分析

2.1 基本性质的变化

表 1 为 4 个代表性土壤剖面的容重和颗粒组成。从表 1 可知,侵蚀区砾石和砂粒含量明显高于堆积区,随着侵蚀强度的增加,砾石和砂粒含量随之增加,而黏粒含量下降。坡底堆积区的颗粒粒径明显小于坡脚堆积区,说明随着搬运距离的增加,沉积的颗粒逐渐变细。表层土壤容重在侵蚀区高于沉积区,这可能与侵蚀区有较多的砾石有关。

2.2 碳库组成及其变化

不同土壤剖面之间碳库大小和组成有很大的差异(表 2)。沉积区土壤各种碳库含量均明显高于侵蚀区。相同深度土层中有机总碳(TOC)和颗粒态有机碳(POC)含量:坡底堆积区 > 坡脚堆积区 > 弱侵蚀区 > 强侵蚀区。随剖面深度的增加,侵蚀区 TOC 和 POC 下降迅速,但堆积区 TOC 和 POC 随土层深度下降较缓慢。堆积区深层土壤 TOC 和 POC

是由于埋藏残留引起的,积累较高;而侵蚀区的有机物质主要起源于地表,深度越深,补给越少,含量也就越低。

黑碳是化石燃料或生物有机体不完全燃烧形成的一种含有芳香环的高聚物^[12],广泛存在于大气、土壤、沉积物、岩石和水中^[13-14]。由于黑碳的高度芳香化结构,其具有较高的生物和化学稳定性。土壤中的黑碳主要来源于大气沉降和火灾。从表2可知,堆积区与侵蚀区土壤黑碳有非常大的差异,在相同深度的土层中,前者与后者可相差达10倍以上,而且坡底沉积区也高于坡脚沉积区,说明黑碳在侵蚀环境下是

极不稳定的,很易随径流失;而进入沉积区后,黑碳的稳定性明显增加,在较深的土层中仍可保留高量的黑碳。这可能与沉积区经常有沉积物沉积,黑碳被埋藏覆盖保护有关。

与 TOC 和 POC 相似,矿物结合态碳、微生物生物量碳(MBC)和水溶性碳在堆积区土壤中明显高于侵蚀区,其中 MBC 在各剖面之间的差异明显高于 TOC。4 个剖面之间的 1 m 土壤中有有机碳贮量(剖面 1 和剖面 2 土层厚度小于 1 m,只考虑基岩以上的土壤部分)有很大的差异(图 2),从坡顶至坡底呈明显的增加。

表 1 代表性土壤剖面颗粒组成

剖面	地形部位	植 被	采样深度/ cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	砾石/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	细土颗粒组成/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
						黏粒	粉粒	砂粒
1	强侵蚀区	马尾松林	0 - 15	1.43	430	172	191	637
			15 - 30	1.41	401	138	284	578
			30 - 42	1.58	538	103	159	738
			42 - (基岩)					
2	弱侵蚀区	马尾松林	0 - 15	1.31	270	202	340	458
			15 - 30	1.27	227	237	285	478
			30 - 45	1.38	183	228	304	468
			45 - 60	1.43	149	182	331	487
			60 - 73	1.39	311	127	371	502
73 - (基岩)								
3	坡脚沉积区	马尾松林	0 - 15	1.22	121	254	378	368
			15 - 30	1.25	97	287	395	318
			30 - 45	1.31	72	301	370	329
			45 - 60	1.28	134	278	421	301
			60 - 75	1.35	128	247	395	358
			75 - 90	1.37	108	208	335	457
			90 - 105	1.33	59	171	284	545
4	坡底沉积区	灌木草丛	0 - 15	1.03	78	252	469	279
			15 - 30	1.11	47	317	325	358
			30 - 45	1.27	72	302	360	338
			45 - 60	1.36	38	264	375	361
			60 - 75	1.48	56	287	305	408
			75 - 90	1.43	102	332	353	315
90 - 105	1.52	58	258	384	358			

侵蚀区的有机碳中有较高比例的 POC(图 3),而在沉积区土壤中以矿物结合态碳为主。随着土壤剖面深度的增加,POC 占 TOC 的比例也有所降低,但下降幅度以侵蚀区土壤更为显著,这显然与侵蚀区土壤 POC 主要起源于地表植物残体。

因此表土明显高于底土,而堆积区土壤中的 POC 除来源于地表植物残体外,还有一部分来源

于侵蚀区与矿物质一起沉积形成的物质,因此其分布较深。

另外,不同剖面及深度 POC 的组成也有较大的差异,相同深度土层侵蚀区的粗颗粒态有机碳(CPOC)占 POC 比例较高,而堆积区土壤中却是细颗粒态有机碳(FPOC)占 POC 比例明显较高,但 CPOC/POC 的比例一般是随深度而下降。

表 2 土壤剖面中不同碳的分布

剖面位置	采样深度/ cm	有机总碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	总 POC/ ($g \cdot kg^{-1}$)	黑碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	MBC/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	矿物结合态 C/ ($g \cdot kg^{-1}$)	水溶性 C/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
强侵蚀区	0—15	8.05	4.72	0.22	53	3.33	14
	15—30	6.43	3.61	0.57	47	2.82	16
	30—42	4.16	1.83	0.14	36	2.33	12
	42 以下(岩石)						
弱侵蚀区	0—15	15.33	6.35	0.51	137	8.98	32
	15—30	11.72	4.16	0.26	58	7.56	18
	30—45	5.34	1.23	0.16	46	4.11	22
	45—60	2.81	0.36	0	33	2.45	14
	60—73	2.92	0.28	0	42	2.64	12
	73 以下(岩石)						
坡脚沉积区	0—15	17.92	7.28	3.68	276	10.64	43
	15—30	13.61	4.65	2.74	128	8.96	31
	30—45	8.43	2.08	1.23	113	6.35	32
	45—60	5.35	1.14	1.36	76	4.21	21
	60—75	5.92	2.02	2.13	84	3.90	31
	75—90	4.61	1.14	1.04	36	3.47	15
	90—105	4.92	0.63	1.83	47	4.29	17
坡底沉积区	0—15	26.73	8.64	5.28	463	18.09	63
	15—30	22.81	6.28	6.24	308	16.53	52
	30—45	17.40	4.14	5.63	196	13.26	47
	45—60	12.82	3.63	4.67	114	9.19	38
	60—75	17.63	4.14	3.18	83	13.49	39
	75—90	8.42	1.28	4.17	74	7.14	25
90—105	11.31	2.03	6.66	78	9.28	27	

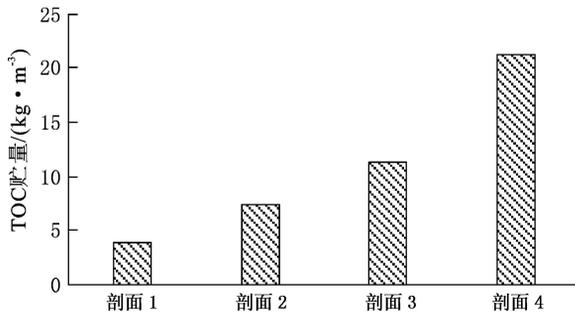


图 2 1 m 土体中有机碳 (TOC) 的贮量

注:剖面 1 和剖面 2 土层厚度小于 1 m,只考虑基岩以上的土壤部分

3 讨论

土壤在水力作用下发生侵蚀,从土壤颗粒分离到最后在低洼的地形部位沉积经历了土壤颗粒的分离、团聚体破坏、泥砂的迁移和再分布及在低洼地沉积等过程^[1]。这些作用过程均可对土壤有机碳产生影响。团聚体的分散和破裂增加了有机碳的不稳定性,促进有机碳的原地矿化;径流的发生可促使有机碳选择性迁移,而侵蚀物的沉积可促进有机碳的再固定和深埋稳定化。

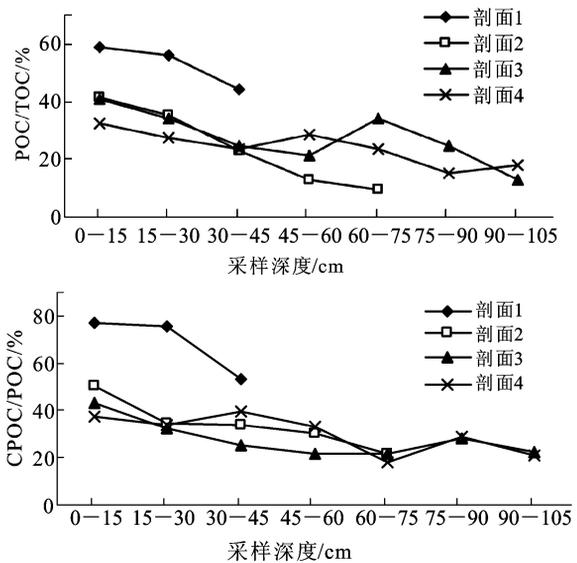


图 3 颗粒态有机碳占总有机碳的百分比 (POC/TOC) 和粗颗粒态有机碳占颗粒态有机碳的百分比 (CPOC/POC)

从以上结果可知,侵蚀过程可导致侵蚀区土壤有机碳的显著下降,特别是矿物结合态碳、黑碳、微生物生物量碳的数量显著下降;而在堆积区,总有机碳数量及其矿物结合态碳、黑碳、微生物生物量碳的数量

则显著提高。这些结果说明,在侵蚀—堆积过程中,矿物结合态碳和黑碳均可发生迁移和再沉积。微生物生物量碳和水溶性有机碳移动性较高,它们易受环境的影响,而土壤侵蚀可优先使这些有机碳发生分解或迁移。

因此,侵蚀区土壤的微生物生物量碳和水溶性有机碳较低可能是径流流失和分解的共同结果。侵蚀的结果导致结构体的破坏,促进了活性碳的不稳定性和分解,同时侵蚀的结果也加速了活性碳的迁移。由于包含有机物质的轻质、细颗粒物相对积累,沉积区比侵蚀区土壤具有更高的微生物生物量碳。

侵蚀的结果造成富含有机碳的表层土壤大量流失,侵蚀改变了土壤水分和温度状况,进一步加速了土壤有机碳的矿化,同时促进了细土颗粒及其结合的矿物态碳的迁移和再沉积^[15]。此外,侵蚀也导致了植物生长条件的改变。土壤侵蚀后,土壤养分和土层厚度均有所降低,影响植物根系的伸展和地表植物的生长,减少了植物残物进入土壤的数量,进而影响到POC的形成,导致有机碳的全面下降。另一方面,来自上坡侵蚀下来的土壤物质在低洼的地形部位大量累积,改善了堆积区土壤肥力水平,促进了坡脚堆积区和坡底堆积区植物生长,促进碳的固定,为堆积区土壤提供了更多的碳源。

因此,土壤侵蚀不仅使坡面中有机碳从一个地方迁移到另一个地方,在低洼区形成碳汇;同时也可影响植物的生长影响而进一步改变土壤有机碳的状况。而且,堆积区由于所处位置较低,水分相对较丰富,其比侵蚀区具有使有机物质更稳定的环境,再加上受外来泥砂的反复堆积,促进了有机碳的埋藏和稳定。埋藏后,因缺乏新鲜有机物质和氧气的补充,其有机碳周转速度明显减慢,变得相当稳定^[16]。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4):437-450.
- [2] 方华军,杨学明,张晓平,等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机质的影响[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(2):77-86.
- [3] 温丽燕,王连峰. 侵蚀及土地利用管理方式改变对土壤有机碳的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(7):362-365.
- [4] 袁东海,王兆骞,郭新波,等. 红壤小流域不同利用方式水土流失和有机碳流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2):24-28.
- [5] Ritchie J C, McCarty G W. ¹³⁷Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 69(1):45-51.
- [6] 李光录,张胜利. 黄土高原南部侵蚀对不同土壤颗粒级碳氮分布的影响[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2007, 35(8):146-150.
- [7] 贾宇平,苏志珠,段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):31-24.
- [8] 贾松伟,贺秀斌,陈云明,等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4):88-90.
- [9] Jacinthe P A, Lal R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosion events[J]. *Land Degradation and Development*, 2001, 12(4):329-339.
- [10] Gregorich E G, Geer K J, Anderson D W, et al. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(2):291-302.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978:132-502.
- [12] Zhang M K, He Z L. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an ultisol under rice cropping in southeast China[J]. *Geoderma*, 2004, 118(1):167-179.
- [13] Aiken G R, Mcknight, D M, Wershaw R L. Humic substances in soils, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985:329-370.
- [14] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution[M]. John Wiley, New York, 1985:1-25.
- [15] Polykov V, Lal R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion[J]. *Environment International*, 2004, 30(4):547-556.
- [16] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450:277-280.