

红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系*

张雪^{1,2} 李忠武^{1,2†} 申卫平³ 郭旺^{1,2} 陈晓琳^{1,2} 张越男^{1,2} 黄金权^{1,2}

(1 湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082)

(2 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室,长沙 410082)

(3 湖南省邵阳市水土保持研究所,湖南邵阳 422000)

摘要 通过野外微型径流小区模拟降雨试验,对坡面小区尺度水力侵蚀过程中物理运移土壤有机碳的规律进行研究。结果表明:2 m × 5 m 径流小区持续降雨 30 min 后,大雨强(1.64 mm min⁻¹)和小雨强(0.58 mm min⁻¹)降雨条件下泥沙携带流失的有机碳总量分别为 56.09 g 和 3.18 g,溶解于径流流失的有机碳总量分别为 13.55 g 和 2.81 g。降雨强度和持续时间对有机碳流失的过程特征有显著影响。降雨强度越大,泥沙携带及溶解于径流的有机碳流失速率和总量也越大。大雨强泥沙有机碳富集比在产流发生后的 18 min 内大于 1,随后降至 1 以下。小雨强泥沙有机碳富集比始终小于 1。大雨强径流有机碳浓度与径流量呈立方关系,小雨强有机碳流失量随径流量增加呈线性递增趋势;大雨强泥沙有机碳含量与泥沙量之间具有明显的立方关系。

关键词 水力侵蚀;土壤有机碳;泥沙;径流;红壤

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

土壤侵蚀是陆地景观中碳再分布以及迁移到水体系统的重要动力之一^[1],且土壤的侵蚀迁移沉积作用能够显著改变全球碳循环过程^[2],每年全球通过水力侵蚀发生的碳通量迁移有 4 gt^[3]。这种巨大的通量对全球碳循环“未知汇”的估计有重要作用,且在农业截留能源碳排放,减缓温室效应的研究中也得到了广泛的重视。因此,探明陆地生态系统中碳的侧向迁移过程成为全球碳循环研究中的一个关键科学问题^[4],也使得水力侵蚀影响下的有机碳迁移过程成为一个非常重要的研究领域。目前,国内关于土壤侵蚀对土壤有机碳的影响研究多集中于黄土高原区和东北黑土区^[5-7],并已取得了一些有益的成果。方华军等^[7]对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进行了深入探讨,认为土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大团聚体,使包裹在大团聚体内的轻质活性碳以及细颗粒结合的惰性碳随地表水流沿坡迁移。贾

松伟等^[8]通过黄绵土野外小区观测和室内分析,研究了不同坡度条件下土壤侵蚀对泥沙中活性有机碳含量及富集比的影响,认为泥沙中活性有机碳呈现出明显富集现象,富集比随着侵蚀强度和坡度的增大均有减小的趋势。这些研究对有机碳不同组分、空间分布特征和流失规律进行了探讨,但对基于过程的有机碳的物理迁移变化机制研究还有待进一步深入。

本文针对水蚀过程中有机碳物理迁移过程机制,利用野外人工模拟降雨试验,对不同雨强条件下红壤丘陵区撂荒坡耕旱地土壤产流产沙及有机碳动态过程进行了研究。本研究旨在讨论红壤丘陵区坡地水力侵蚀过程对土壤有机碳物理运移过程的影响,探讨有机碳流失量与泥沙径流流失量之间的定量关系,丰富侵蚀影响土壤有机碳侧向迁移的基本理论,并为红壤丘陵区水土保持规划及生态环境保护提供科学依据。

* 国家自然科学基金项目(40971170)、教育部新世纪人才项目(NCET-09-330)和湖南省自然科学基金项目(11JJ3041)资助

† 通讯作者,E-mail:lizhongwu@yahoo.com.cn

作者简介:张雪(1987—),女,四川乐山人,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀及其环境效应。E-mail:xuezhangin1987@163.com

收稿日期:2011-06-17;收到修改稿日期:2012-02-10

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于湖南省邵阳市水土保持研究所(27°03'N, 111°22'E), 属于中亚热带湿润季风气候区。该区域海拔高度 231.2 ~ 276.6 m, 多年平均气温 17.1℃, 年平均降雨量 1 218 ~ 1 473 mm; 主要地貌类型为丘陵、岗地; 土壤以第四纪红色黏土发育而成的地带性红壤、黄壤及第四纪松散堆积物为主, 属于典型的红壤丘陵区。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区布设 选择一块面积约 5.0 m × 5.0 m、平均坡度约为 15° 的坡耕地作为本研究的典型地块。该地块与研究区域的平均坡度(10° ~ 15°) 较相符。该坡耕地实验前曾种植尾参(*Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce), 采收以后处于地表裸露状态, 撂荒 1a 后, 进行径流小区的布设。在选定地块上沿坡面最大坡降方向设置两个彼此平行

的 2.0 m × 5.0 m 临时微型径流小区, 即小区长边垂直于等高线(图 1)。小区边界处用铁皮进行围合, 铁皮插入地面约 10 cm。人工模拟降雨器采用 Spraco 喷头(美国 Spraco 公司), 喷头距离地面 4.57 m。模拟降雨器为下喷式, 由高 4.57 m 的直立竖管, 连接于直立竖管顶端的 0.9 m 长的水平延伸管及连接于延伸管末端的下喷头、支架组成; 水平延伸管垂直于小区长边向内, 支架轴心点距小区边界 0.2 m。经测试, 该套模拟降雨器的平均雨滴直径为 2.4 mm, 降雨均匀性系数达 89.75%。大小雨强设置在综合考虑研究区域近 5 a 来次降雨雨强变化状况后, 初步确定为 0.4 ~ 0.6 mm min⁻¹ 和 1.5 ~ 1.7 mm min⁻¹。地块基本理化性质测定为: 0 ~ 20 cm 土壤有机碳平均含量为 4.39 g kg⁻¹, 全磷平均含量 0.60 g kg⁻¹, 全氮平均含量 0.79 g kg⁻¹。土壤黏粒含量为 (16.72 ± 0.83)% (n = 15), 粉粒为 (27.50 ± 0.45)% (n = 15), 砂粒为 (55.77 ± 0.63)% (n = 15), 土壤为砂质黏壤土。降雨前土壤平均含水量约为 (0.14 ± 0.01) g g⁻¹ (n = 15)。

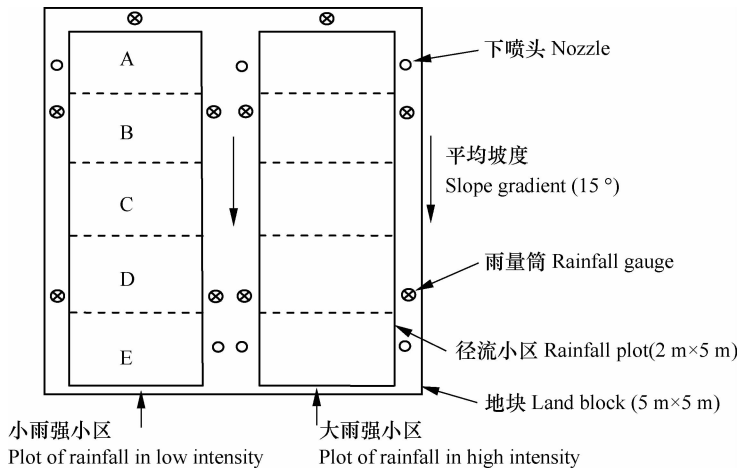


图 1 径流小区布设示意图

Fig. 1 A schematic layout of runoff plots

1.2.2 模拟降雨实验 根据率定试验的结果, 将立式模拟降雨器在小区右上角和左下角分立两个, 用两套模拟降雨器先在左边径流小区进行 0.4 ~ 0.6 mm min⁻¹ (小雨强) 模拟降雨; 然后将立式模拟降雨器在小区两侧排成两列, 两两相对, 每列 2 个, 用 4 套降雨器在右边径流小区进行 1.5 ~ 1.7 mm min⁻¹ (大雨强) 模拟降雨。降雨结束后, 根据小区边界处 5 个雨量筒的记录值计算得出小雨强降雨的实际雨强为 0.58 mm min⁻¹, 大雨强降雨的实际雨强为 1.64 mm min⁻¹。

1.2.3 泥沙样和水样的采集和分析 降雨试验过程中, 大小雨强均在集水口处产流后, 每 3 min 取一次水沙样, 测一次径流量, 降雨持续 30 min。待降雨结束以后, 继续取水沙样, 测径流量直至断流, 从而结束一个小区模拟降雨试验。最后, 将在降雨过程中所取水沙样过滤, 所得泥沙风干、称重后, 将泥沙样送至湖南省农业科学院农化检测中心进行泥沙有机碳含量测定, 测定方法为油浴重铬酸钾外加热法, 过滤所得水样利用 IL 550 TOC-TN 分析仪(美国 Hach 公司)测定其有机碳含量。

1.2.4 数据分析 利用 SPSS16.0 对数据进行分析, 曲线拟合的显著性水平均设定为 0.05, 并利用 Origin 8.0 制图。

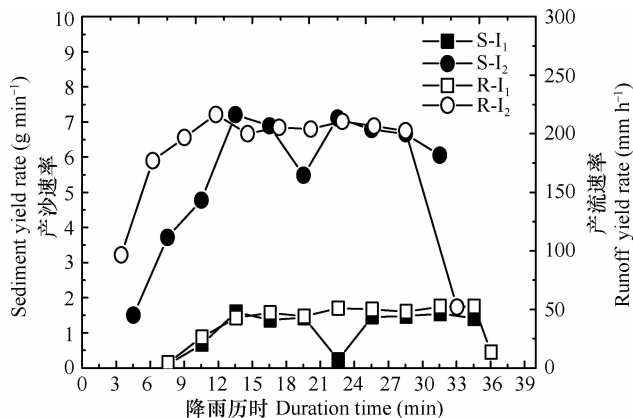
2 结果与分析

2.1 径流与泥沙的流失特征

通过分析不同雨强条件下产流产沙时间规律, 可以得到雨强对径流与泥沙的流失过程特征的影响规律。由图 2 可知, 整个降雨过程中两个雨强条件下的径流泥沙流失规律可大致分为 4 个阶段。第一阶段从降雨开始直到初始产流发生。不同雨强条件下, 坡面小区的初始产流时间不同。小雨强(降雨强度为 0.58 mm min^{-1} , 下文相同)时, 初始产流时间为 $4'34''$; 而大雨强(降雨强度为 1.64 mm min^{-1} , 下文相同)时, 初始产流时间仅为 $1'31''$ 。这表明随着降雨强度的增大, 小区初始产流时间缩短。在这一阶段土壤入渗能力大于雨强, 雨水全部入渗, 因此无明显地表径流和泥沙流失, 产流产沙速率均为 0, 侵蚀方式以击溅侵蚀为主。第二阶段从初始产流开始直到 $13'30''$ 左右。在这一阶段, 土壤水分含量趋于饱和, 入渗率等于或小于雨强, 地表开始积水, 并随之产生地表径流, 开始发生径流侵蚀。随着降雨持续时间延长, 产流强度明显加大, 不同雨强的产流速率和产沙速率均快速增大。第三阶段始于 $13'30''$ 左右, 产流和产沙速率进入到一个相对稳定的状态。第四阶段始于降

雨结束, 随着降雨的停止, 产流产沙速率下降直至完全断流。不同强度降雨的断流时间均在 36 min 左右。由于停止降雨以后产流明显减小, 最后一个径流样本因泥沙量过小而未进行测定。因此, 由图 2 可以看出最后一个产流速率值有明显下降趋势, 而产沙速率该值空缺。两种雨强条件下产沙与产流过程相关性较好, 这与前人对农地的研究结果相似^[9], 但产沙过程较产流过程更为复杂, 在第三阶段出现了一个明显的低峰值, 且大雨强产沙速率低峰值较之小雨强更早出现, 这可能与红壤特性和降雨特征有关。因为红壤水蚀过程中团聚体破坏的主要机制是快速湿润分解、雨滴击溅的机械分解^[10]以及径流剪切力作用^[11]。产流发生前表土层以快速分解和雨滴的击溅侵蚀为主。初始产流后, 径流侵蚀所起作用开始变大。随着径流强度变大, 局部坡面开始发育细沟, 伴随着能量的消耗, 造成了产沙强度明显降低。雨强越大, 细沟开始发育所需的时间越短, 因此坡面产沙速率的下降趋势在雨强较大时更早出现。

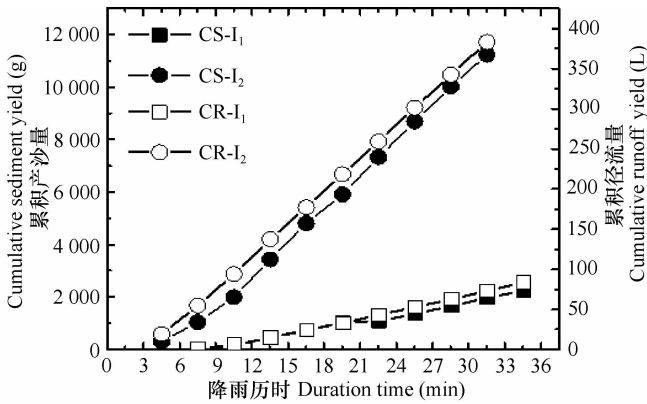
累积径流量和产沙量则表现出随降雨时间的延长增大的趋势, 且水沙过程相关性好, 增加趋势均较稳定(图 3), 这一水沙特性不同于黄土^[9], 说明红壤产流产沙过程具有相对稳定的特点, 这可能是红壤质地较黄土更加黏重的原因。从斜率变化来看, 雨强越大, 累积径流量与累积产沙量的递增速率也越大。



S-I₁, 小雨强产沙速率; S-I₂, 大雨强产沙速率; R-I₁, 小雨强产流速率; R-I₂, 大雨强产流速率
S-I₁, sediment yield rate of rainfall low in intensity; S-I₂, sediment yield rate of rainfall high in intensity;
R-I₁, runoff loss rate of rainfall low in intensity; R-I₂, runoff loss rate of rainfall high in intensity

图 2 不同雨强条件下产流产沙速率的过程曲线特征

Fig. 2 Curves showing variation of runoff and sediment loss rates in rainfalls different in intensity



CS-I₁, 小雨强累积泥沙量; CS-I₂, 大雨强累积泥沙量; CR-I₁, 小雨强累积径流量; CR-I₂, 大雨强累积径流量
 CS-I₁, cumulative sediment yield of rainfall low in intensity; CS-I₂, cumulative sediment yield of rainfall high in intensity;
 CR-I₁, cumulative runoff volume of rainfall low in intensity; CR-I₂, cumulative runoff volume of rainfall high in intensity

图3 不同雨强条件下累积径流泥沙量过程曲线特征

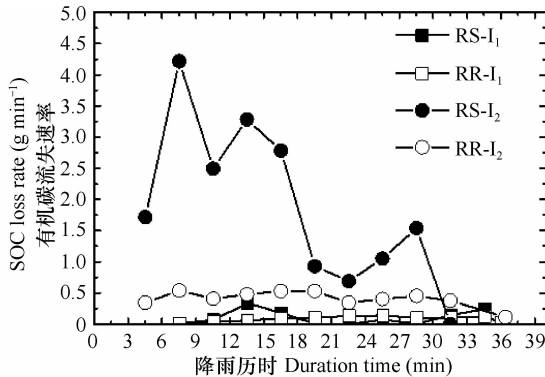
Fig. 3 Curves showing variation of cumulative runoff and sediment yields in rainfalls different in intensity

2.2 有机碳流失特征

2.2.1 有机碳流失速率变化特征 从图4可以看出,有机碳随径流和泥沙流失的速率过程曲线与产流产沙速率过程曲线(图2)不同。两个雨强条件下溶解于径流的有机碳流失速率过程线比较平稳,大雨强流失速率大于小雨强。泥沙携带的有机碳流失速率过程曲线变化比较复杂,呈现出多峰多谷的特点,大雨强条件下流失速率明显高于小雨强。大雨强条件下产流开始以后,泥沙携带的有机碳流失速率明显增大,在约7'31"到达峰值以后,呈现逐步的波动下降趋势。小雨强降雨过程有相似的变化趋势,第一个波峰值出现于10'34"左右,但流失速

率总体较小,波动趋势不如大雨强条件下显著。比较同一雨强条件下有机碳随泥沙和径流流失速率过程曲线可以看出,同一雨强条件下,泥沙携带的有机碳流失速率大于径流携带的有机碳流失速率。随着雨强增大,这种差异也更为明显。

总体而言,有机碳流失速率与产流产沙速率没有很好的相关性,且泥沙携带的有机碳较溶解于径流的有机碳流失速率波动更大,受到雨强的影响更为显著。这说明泥沙携带的有机碳流失速率一方面受到其载体泥沙流失速率的影响,另一方面可能受到侵蚀力引起的土壤团聚体的分离解析作用影响^[12],其变化较泥沙过程更为复杂。



RS-I₁, 小雨强泥沙携带的有机碳流失速率; RS-I₂, 大雨强泥沙携带的有机碳流失速率; RR-I₁, 小雨强径流携带的有机碳流失速率;
 RR-I₂, 大雨强径流携带的有机碳流失速率

RS-I₂, sediment-associated OC loss rate of rainfall low in intensity; RS-I₂, sediment-associated OC loss rate of rainfall high in intensity;
 RR-I₁, runoff-associated OC loss rate with runoff of rainfall low in intensity; RR-I₂, runoff-associated OC loss rate of rainfall high in intensity

图4 不同雨强条件下径流泥沙有机碳速率过程曲线特征

Fig. 4 Curves showing variation of organic carbon (OC) loss rate with runoff and sediment in rainfalls different in intensity

2.2.2 径流泥沙中有机碳含量变化特征 图 5 表明,两个雨强条件下,径流及泥沙有机碳含量均在产流初始阶段有递减趋势(大雨强更为明显),随后进入剧烈的波动状态。在大雨强条件下 7'31"至 10'31"的取样时间段内,泥沙有机碳含量递减率高达 $3.06 \text{ g kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$,此后递减趋势有所减缓。这种剧烈的递减趋势可能与雨强较大时径流速率较大有关。因为由 2.1 可知,雨强越大,径流速率越大。而由曼宁流速公式

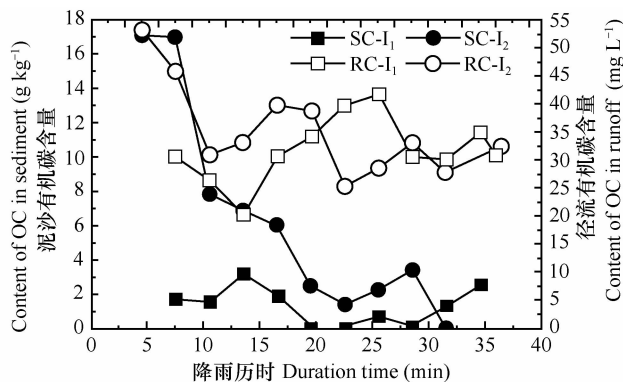
$$V = \frac{k}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

式中, V 为水流断面的平均速度; k 为转换常数,国际单位制中值为 1; n 为曼宁系数,是综合反映粗糙情况对水流影响的一个系数; R_h 为水力半径; S 为坡度。可知,在 k 、 n 、 S 不变的情况下,径流速率越大, R_h 必然增大,即径流变得更快的同时会更集中成股,对表土层的冲刷作用更大。雨滴打击引起团聚体的破碎一般发生在降雨的最初几分钟^[13],加上快速湿润引起的消散作用引起了红壤团聚体的分解^[10],使可溶于水的有机碳部分迅速溶于

径流,造成径流和泥沙中有机碳含量较高。随着降雨持续时间的延长,土壤表层易于被搬运和溶解于水的有机碳被大量消耗,因此径流和泥沙中有机碳含量迅速下降。小雨强降雨时剧烈的冲刷作用不明显,因此有机碳含量的递减趋势较大雨强也较弱。

总体而言,同一雨强条件下径流和泥沙中有机碳含量过程曲线没有很好的相关性。雨强对泥沙中有机碳含量有显著影响,雨强越大,泥沙中有机碳含量越大,这与贾松伟等^[14]在黄土丘陵区的研究结果不一致,他们的研究表明,泥沙中有机碳含量与侵蚀强度呈递减的对数关系,这可能与降雨侵蚀强度不同有关。

2.2.3 有机碳富集特征 从有机碳流失总量来看,除降雨结束后所取最后一个径流样本因泥沙量少未进行测量以外,大、小雨强条件下泥沙携带流失的有机碳总量分别为 56.09 g 和 3.18 g,溶解于径流流失的有机碳总量分别为 13.55 g 和 2.81 g。可见,载体对有机碳流失量的影响在雨强越大时更为显著。



SC-I₁, 小雨强泥沙中有机碳含量; SC-I₂, 大雨强泥沙中有机碳含量; RC-I₁, 小雨强径流中有机碳含量; RC-I₂, 大雨强径流中有机碳含量

SC-I₁, OC concentration in sediment produced by rainfall low in intensity; SC-I₂, OC concentration in sediment produced by rainfall high in intensity; RC-I₁, OC concentration in runoff produced by rainfall low in intensity; RC-I₂, OC concentration in runoff produced by rainfall high in intensity

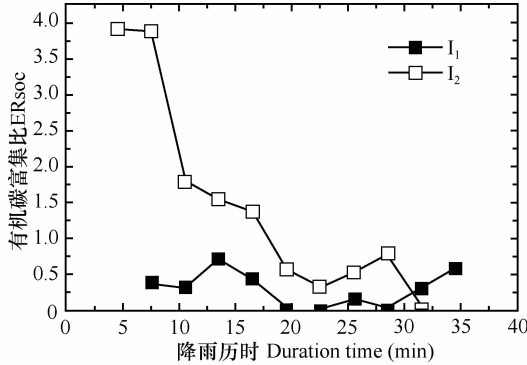
图 5 不同雨强条件下径流泥沙有机碳含量过程曲线特征

Fig. 5 Curves showing variation of organic carbon (OC) concentration in runoff and sediment in rainfalls different in intensity

产流发生后,由于径流首先选择搬运土壤细颗粒,泥沙中细颗粒特别是黏粒含量显著增加,结果导致泥沙黏粒的富集^[5-6]。大多数的研究表明,黏粒等小粒级土壤是有机碳流失的主要载体^[1,15],有机碳在泥沙中呈现富集现象。富集比指侵蚀泥沙中某种土壤组分的含量与原地土壤中该组分含量的比值^[16]。图 6 分析结果表明,雨强越大,有机碳的富集现象越

明显。大雨强条件下,泥沙中有机碳的富集比在初始产流阶段达到 3.9 左右,随后剧烈下降。产流后 18 min 内,有机碳富集比大于 1,随后波动于 1 以下直至降雨结束。这可能是由于轻质的黏粒和砂粒组分中有机碳的含量较高,径流优先选择搬运该部分有机碳^[17-18],细颗粒土壤黏粒和砂粒的富集导致了初始产流阶段富集比很大。随着降雨持续时间

的延长,继续冲刷流失的土壤中细颗粒较少,泥沙中有机碳富集比随之减小。小雨强条件下,富集比始终小于1并呈现多峰多谷的特点,这可能是由于径流流速小,径流在土壤表层的滞留时间延长,径流的下渗量较大,黏粒和有机物质的淋滤作用较明显,导致有机碳在泥沙中无明显的富集现象^[19]。



I₁, 小雨强下泥沙中有机碳富集比; I₂, 大雨强下泥沙中有机碳富集比
I₁, ER_{soc} of rainfall low in intensity; I₂, ER_{soc} of rainfall high in intensity

图6 不同雨强条件下有机碳富集比过程曲线变化特征
Fig. 6 Curves showing enrichment ratio of organic carbon (ER_{soc}) in sediment in rainfalls different in intensity

本研究的结果表明,在坡面尺度的水蚀过程中,大雨强条件下泥沙中有机碳含量大于小雨强,且富集比也远远大于小雨强,这与众多的研究结果不一致^[6,13,20-21]。如Jin等^[6]对黄土的研究结果为,降雨强度越小,泥沙富集比越大,因为相比高强度的降雨,低强度的降雨对有机碳的选择性分解迁移更加明显^[1],导致泥沙中有机碳的富集较大。高强度降雨中泥沙流失速率的增加将会降低侵蚀过程的选择性,使大颗粒物质的迁移量增加^[22],而细颗粒中有机碳的含量远大于粗颗粒^[23],因此泥沙中有机碳的富集程度降低。本研究中,大雨强条件下泥沙中有机碳的富集比平均值为1.472,小雨强降雨为0.301,泥沙中有机碳的富集现象并不明显,雨强较小时甚至没有。这可能是由于影响泥沙迁移以及该过程中碳崩解和迁移阈值的因素将会影响土壤受到侵蚀作用后的泥沙中有机碳的富集特征^[24],而试验红壤的砂质组分比例较高,黏粒组分比例较小,可供迁移的黏粒相对较少。这说明,有机碳在泥沙中的富集除了与不同的侵蚀过程有关^[22],还与降雨强度和土壤性质有密切关系。

2.3 有机碳流失量与土壤流失量之间的定量关系

2.3.1 径流携带的有机碳与径流量之间的定量关系 通过分析有机碳流失量与土壤侵蚀量以及

径流量之间的定量关系,可以进一步得出坡面小区尺度土壤侵蚀对土壤有机碳流失特征的影响。由图7可知,大雨强降雨条件下,径流量与有机碳含量之间三次关系方程式的拟合效果较为理想, $R^2 = 0.697 (p = 0.031)$ 。这可能是由于径流量逐渐增大时,土壤有机碳溶解能力增强,因此径流有机碳含量增大。然而当径流量增大到一定值时,粒径较细土粒大部分已流失,粗颗粒沉积于土表,可供溶解的有机碳明显减少,导致径流量增大而径流有机碳浓度反而减小。这一结果与2.2.3部分的结果相一致。小雨强条件下径流量与有机碳含量之间不存在显著的定量关系,这可能也与雨强较小时有机碳没有富集现象有关(见2.2.3部分)。图8表明,除断流样外,小雨强条件下有机碳流失量与径流量之间的线性拟合关系较好, $R^2 = 0.81 (p = 0.000)$ 。由此可知,径流量越大,溶解于径流而流失的有机碳量越大。

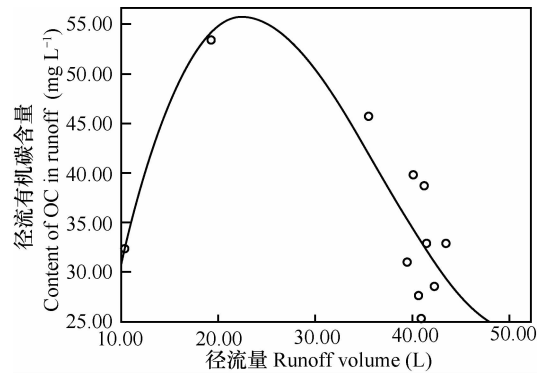


图7 大雨强条件下径流中有机碳含量与径流量之间的定量关系 (n = 11)

Fig. 7 Quantitative relationship between content of organic carbon (OC) in runoff and runoff volume of rainfalls high in intensity (n = 11)

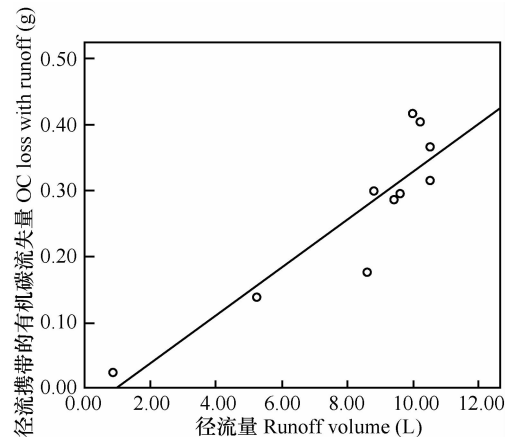


图8 小雨强条件下溶解于径流的有机碳流失量与径流量之间的定量关系 (n = 10)

Fig. 8 Quantitative relationship between organic carbon (OC) loss with runoff and volume of runoff in rainfalls low in intensity (n = 10)

2.3.2 泥沙携带的有机碳与泥沙流失量之间的定量关系 大雨强条件下泥沙中有机碳的含量与泥沙流失量之间具有明显的立方拟合关系, $R^2 = 0.922 (p = 0.001)$ 。由前述分析可知(图 2、图 4 和图 5), 侵蚀产沙过程和有机碳流失过程均较复杂, 呈现明显的峰值或波动趋势。但图 9 结果表明, 侵蚀泥沙量与其携带的有机碳流失量之间的定量关系也出现了相似特点, 有明显的高峰和低峰值交替出现过程。小雨强条件下, 泥沙有机碳含量与泥沙流失量之间的定量关系不明显 ($p < 0.05$)。从有机碳流失总量来看, 大小雨强条件下, 随泥沙流失的有机碳总量与泥沙量之间的拟合关系均不能通过 0.05 水平上的显著性检验。

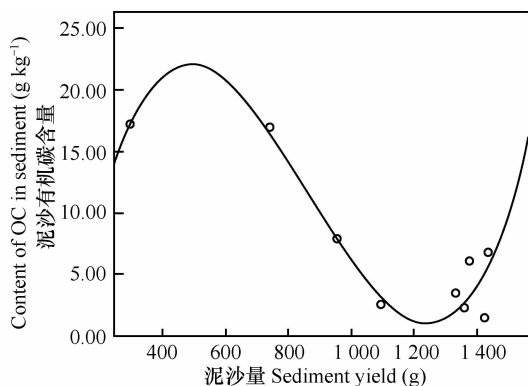


图 9 大雨强条件下泥沙中有机碳含量与泥沙量之间的定量关系 ($n = 10$)

Fig. 9 Quantitative relationship between content of organic carbon (OC) in sediment and sediment yield rainfalls high in intensity ($n = 10$)

3 讨 论

本研究结果表明, 水蚀作用下有机碳的流失过程机制是极其复杂的, 其流失速率与其载体不一致, 含量随时间的变化也呈现多峰多谷的波动特点。红壤作为中国南方一种典型的地带性土壤, 有机碳流失过程有其自身特点。

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, 并沿坡向下迁移这种可移动的细小颗粒^[7], 同时部分有机碳和黏粒通过淋滤发生垂向迁移, 进入到更深层的土壤^[19]。侧向迁移的有机碳中较稳定的部分迁出坡面, 进入更大尺度的碳循环系统。根据前人的研究结果, 土壤中矿物结合态有机碳 (Mineral-bonded organic carbon, MOC) 是与细粒矿物质结合的有机碳部分, 相对比较稳定^[25], 不易被微生物分解, 但易被地表水流优先搬运, 随

地表水流迁移流失^[26]。此外, 与土壤砂粒组分结合的那部分有机碳 (颗粒有机碳, Particulate organic carbon, POC) 属于“慢”分解有机碳库^[27], 密度较小, 也易被地表水流携带迁移流失^[17]。这部分有机碳均以泥沙作为载体从坡面小区迁移流出。随径流迁移流失的那部分有机碳属于水溶性的部分, 即水溶性有机碳 (Water soluble organic carbon, WSOC)。这部分有机碳移动性高, 易矿化分解, 对植物和微生物来说活性较高, 是有机碳流失中需要重视的组成部分。有研究认为, 南方红壤水稻土的水热条件较好, 有机质更新较快而导致腐殖质的结构简单, 可溶性较高^[28]。本研究中小雨强降雨条件下, WSOC 流失总量与泥沙搬运流失的有机碳总量相差甚小, 表明当雨强不足以大量搬运土壤颗粒时, WSOC 流失可能是土壤有机碳损失的一个非常重要的途径。方华军等^[29]对黑土的研究结果表明, 侵蚀部位土壤 WSOC 含量在沿坡向下迁移的同时, 在垂直方向上也发生淋溶。这说明除了随径流直接流失, WSOC 的垂向迁移也比较重要。这也可能是本研究中小雨强泥沙有机碳的富集小于 1 的原因之一。另一个可能的原因是由于 WSOC 主要吸附在黏粒上^[30], 伴随着黏粒的向下垂直迁移作用^[19], WSOC 也会垂向迁移。总体而言, 作为有机碳流失的载体, 泥沙侵蚀过程对有机碳流失特征的影响较径流更为复杂。

从有机碳含量与径流量和泥沙量的定量关系看, 并没有简单的正相关关系存在, 峰值较明显。随着降雨量、径流量和泥沙流失量的增加, 有机碳的流失总量也相应增加, 这与袁东海等^[31]对红壤的研究结果相似, 表明尽管含量特征变化复杂, 有机碳的流失总量与降雨强度呈正相关关系。

本研究针对坡面尺度水力侵蚀对有机碳物理运移过程特征的影响进行了一些探讨, 然而研究尺度的改变可能导致不同的研究结论^[32]。有机碳离开坡面以后, 可能在小流域内发生再分布, 形成局地碳汇, 也有可能离开小流域随着水体系统进入更大尺度的生物化学碳循环。本研究主要考虑侵蚀对有机碳物理迁移机制的作用, 涉及有机碳的化学结构和动态的微生物学机理较少, 然而各不同尺度有机碳动态的主要影响因素是不同的, 在今后的研究中应该更为深入地进行探讨。

4 结 论

本研究的研究结果表明:

1) 降雨强度越大,有机碳流失速率越快,径流泥沙中有机碳含量越大;

2) 大雨强和小雨强降雨条件下随泥沙流失的有机碳总量分别为 56.09 g 和 3.18 g,随径流流失的有机碳总量分别为 13.55 g 和 2.81 g,表明雨强越大,载体对有机碳流失量的影响越明显,即侵蚀泥沙对有机碳流失的作用越突出。

3) 大雨强条件下泥沙中有机碳的富集比平均值为 1.472,小雨强降雨为 0.301,泥沙中有机碳的富集现象并不明显,雨强较小时甚至没有。

4) 尽管含量特征变化复杂,有机碳的流失总量与降雨强度呈正相关关系。

综上所述,红壤泥沙径流有机碳的特征及其与坡面径流量和泥沙量的定量关系极其复杂,可能受到降雨强度、降雨持续时间以及红壤特性,尤其是土壤质地的影响。本研究发现,降雨强度和土壤特性的共同作用可能对有机碳的流失特征有强烈作用,特别是对泥沙中有机碳的富集比这一反映不同侵蚀机制对土壤有机碳作用的重要指标有显著影响,只有当降雨强度增大到一定值时,泥沙中有机碳才出现富集现象。这种阈值的存在其他研究中也曾有所体现^[33],今后应以更多的试验来加以论证。

参 考 文 献

[1] Jacinthe P A, Lal R, Owens L, et al. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77(2): 111—123

[2] Quinton J N, Govers G, Van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 311—314

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1 623—1 627

[4] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 231—257

[5] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 541—544. Zhang X C, Shao M A. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded bedloads (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4): 541—544

[6] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena*, 2009, 78(1): 81—86

[7] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 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. *生态学报*, 2006, 26(9): 2 847—2 854. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, 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 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2 847—2 854

- [8] 贾松伟, 贺秀斌, 韦方强. 黄绵土土壤活性有机碳的侵蚀和沉积效应. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 10—13. Jia S W, He X B, Wei F Q. Erosion and deposition effects of soil labile organic carbon in Loessal soil (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 10—13
- [9] 琚彤军, 刘普灵, 徐学选, 等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究. *泥沙研究*, 2007(4): 65—71. Ju T J, Liu P L, Xu X X, et al. Experimental study on runoff and sediment process in primary-lands in loess hilly regions under different rainfall conditions (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2007(4): 65—71
- [10] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena*, 2010, 81(3): 240—248
- [11] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 129—136
- [12] Polyakov V O, Lal R. Soil organic matter and CO₂ emission as affected by water erosion on field runoff plots. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 216—222
- [13] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响. *生态学报*, 2007, 27(6): 2 516—2 522. Guo W, Shi Z H, Chen L D, et al. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2 516—2 522
- [14] 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. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 88—90. Jia S W, He X B, Chen Y M, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss on the Loess Hilly Areas (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 88—90
- [15] Ramos M C, Martinez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedes region (NE Spain). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1/4): 356—363
- [16] Massey H F. Selective erosion of soil fertility constituents. *Soil Science Society of America Journal*, 1952, 16(4): 353—356
- [17] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29(4): 437—450
- [18] Bajracharya R M, Kimble R. Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio Alfisol. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 694—700
- [19] Fullen M A, Yi Z, Brandsma R T. Comparison of soil and sediment properties of a loamy sand soil. *Soil Technology*, 1997, 10(1): 35—45
- [20] Polyakov V O, Lal R. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. *Soil Science*, 2004, 169(8): 590—599
- [21] Rumpel C, Chaplot V, Planchon O, et al. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slash and burn agriculture. *Catena*, 2006, 65(1): 30—40

- [22] Schiettecatte W, Gabri ls D, Cornelis W, et al. Enrichment of organic carbon in sediment transport by interrill and rill erosion processes. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 50—55
- [23] Christensen B. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Sciences*, 1992, 20: 1—90
- [24] Truman C C, Strickland T C, Potter T L, et al. Variable rainfall intensity and tillage effects on runoff, sediment, and carbon losses from a loamy sand under simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(5): 1 495—1 502
- [25] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G, et al. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(1): 101—108
- [26] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 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. *土壤学报*, 2007, 44(3): 468—474. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Effects of soil erosion and deposition on loss and accumulation of soil organic carbon in physical fractions (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 468—474
- [27] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777—783
- [28] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544—552. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544—552
- [29] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 59—63. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Spatial distribution and its biologic availability of labile organic carbon of black soil at sloping field (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 59—63
- [30] Chen J S, Chiu C Y. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. *Geoderma*, 2000, 96(1/2): 19—30
- [31] 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. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 24—28. Yuan D H, Wang Z Q, Guo X B, et al. Properties of soil and water loss and organic carbon loss from small watershed under different land use patterns in red soil area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 24—28
- [32] Van Oost K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 2007, 318(5850): 626—629
- [33] Strickland T C, Truman C C, Frauenfeld B. Variable rainfall intensity effects on carbon characteristics of eroded sediments from two coastal plain ultisols in Georgia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(3): 142—148

CHARACTERISTICS OF LOSS OF ORGANIC CARBON IN RED SOIL AND THEIR QUANTITATIVE RELATIONSHIPS WITH SEDIMENT AND RUNOFF GENERATION

Zhang Xue^{1,2} Li Zhongwu^{1,2†} Shen Weiping³ Guo Wang^{1,2} Chen Xiaolin^{1,2} Zhang Yuenan^{1,2} Huang Jinquan^{1,2}

(1 College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2 Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

(3 The Institute of Soil and Water Conservation of Shaoyang, Shaoyang, Hunan 422000, China)

Abstract Through plot-scaled field rainfall simulation experiments, effects of water erosion on transportation of soil organic carbon on a slope were analyzed. Results show that after 30 minutes of rainfall, the total sediment-associated loss of organic carbon was 56.09 g and 3.18 g, respectively, and the total runoff-associated loss of organic carbon was 13.55 g and 2.81 g from a plot 2 m × 5 m in size. Intensity and duration of rainfalls had significant effects on the process of soil organic carbon loss. The higher the rainfall intensity, the quicker and the more organic carbon was lost with sediment and runoff. In the initial 18 minutes of runoff triggered by rainfall of high intensity, the organic carbon enrichment ratio (ER-soc) of the sediment is higher than 1, and afterwards it dropped below 1, while throughout the rainfall event low in intensity it remained below 1. During the rainfall event high in intensity, a cubic regression relationship was observed between concentration of soil organic carbon in runoff and volume of the runoff, and the concentration of organic carbon in sediment was related to volume of the sediment, showing an obvious cubic relationship. For the low intensity rainfall, a linear relationship appeared demonstrating a rising trend of organic carbon loss with volume of the runoff.

Key words Water erosion; Soil organic carbon; Sediment; Runoff; Red soil