DOI:10.11766/trxb201211150468

雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究*

聂小东[1,2]　李忠武[1,2†]　王晓燕[3]　申卫平[4]　张　雪[1,2]
郭　旺[1,2]　马文明[1,2]　王曙光[4]

(1 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙　410082)
(2 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙　410082)
(3 长沙理工大学土木与建筑学院, 长沙　410076)
(4 邵阳市水土保持科学研究所, 湖南邵阳　422000)

摘　要　在典型红壤丘陵区平均坡度为 10°的坡耕地径流小区 (2 m×5 m) 上进行降雨强度为 1.69 mm min^{-1}(大雨强)、1.31 mm min^{-1}(中雨强)和 0.64 mm min^{-1}(小雨强)的模拟降雨试验,并对模拟降雨过程中泥沙的迁移规律和泥沙有机碳的流失富集规律进行了研究。结果表明:侵蚀作用下泥沙流失量随着降雨强度的增大而增加,并与径流量呈显著的立方关系,径流量是坡耕地土壤流失的重要影响因素;土壤有机碳流失以泥沙结合态为主,泥沙态有机碳流失量占总有机碳流失量的 84% 以上,最高达 97.6%;泥沙中有机碳富集比随着降雨强度的增大而逐渐减小,有机碳的选择性迁移在低强度降雨条件下表现更为明显;中雨强和小雨强下有机碳的富集比与黏粒的富集比分别呈极显著和显著正相关,而大雨强泥沙有机碳富集比与黏粒富集比没有显著的线性关系。雨强是影响泥沙流失和泥沙有机碳迁移的重要因素。

关键词　降雨强度;坡耕地;泥沙;有机碳;富集比
中图分类号　S156.3　　**文献标识码**　A

土壤侵蚀作为全球范围内一种较为普遍的生态环境问题,对土地质量、作物生产力和生态环境质量产生了极大威胁[1],更对全球碳循环产生了不良影响[2]。据估算,每年由于侵蚀释放到大气中的碳储量为 $0.8\times10^{12}\sim1.2\times10^{12}$ kg[3]。因而侵蚀对土壤碳循环的影响越来越受到人们的重视,但是研究者对于侵蚀在全球碳循环中作用的认识还存在较大争议,侵蚀碳的"源与汇"之争是其中非常重要的问题[4-5]。该争议的关键问题集中在侵蚀中土壤碳的动态过程和在景观中沉积后的去向两个方面[5],而 IPCC(政府间气候变化委员会)[6]认为土壤碳的横向迁移是全球碳平衡中最大的不确定性因素,但相关机制还有待进一步研究。因此,侵蚀作用下土壤碳迁移成为国内外研究的热点。

土壤侵蚀导致径流和泥沙流失,其中更伴随有机碳的损失。研究者对于径流和泥沙在土壤有机碳迁移过程中的作用有不同的观点,有研究发现通过泥沙流失的有机碳含量和通过径流流失的有机碳含量相当,二者没有明显差异[7],但也有研究认为泥沙迁移是土壤有机碳流失的主要原因,有高达 95% 的碳是随着泥沙迁移而流失[8]。这主要和土壤有机碳在不同侵蚀条件下随水沙迁移的复杂性有密切联系,其中泥沙有机碳的富集规律就是这种复杂性的反映。泥沙有机碳富集比是反映有机碳富集规律的重要指标,相关研究表明,黄土丘陵区的泥沙有机碳富集比始终大于 1[8];而在红壤丘陵区的模拟降雨实验研究发现,泥沙中有机碳富集比在大雨强条件下大于 1,而在小雨强条件下泥沙中有机碳则几乎没有富集[9];但 Jacinthe 等[10]却认为与高强度降雨相比,土壤碳在低强度降雨中泥沙富

* 国家自然科学基金项目(40971170,41271294)、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: lizw@hnu.edu.cn
作者简介:聂小东(1989—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事侵蚀与土壤碳循环关系研究。E-mail:nxd@hnu.edu.cn
收稿日期:2012-11-15;收到修改稿日期:2013-00-20

集比更高,显示出更高的选择性。造成这些差异的原因是多方面的,也是侵蚀与土壤碳流失的重点研究领域,其中 Polyakov 和 Lal[11] 认为坡长和降雨持续时间对泥沙有机碳富集比有重要影响,Wang 等[12] 研究发现有机碳富集比随着季节和降雨强度的变化而变化;同时,土地管理方式和植被条件[13] 以及土壤类型等[9] 也被认为与有机碳富集比密切相关。以上分析表明,影响泥沙迁移规律的相关因素非常复杂,致使不同研究者在有机碳富集等方面的研究产生了很大的差异。因此,有待进一步开展相关研究。

本研究采用模拟降雨试验方法,通过对红壤丘陵区不同降雨强度条件下径流与泥沙的流失关系、泥沙与有机碳横向迁移机制以及泥沙中有机碳的富集规律的研究,探讨红壤丘陵区土壤流失规律和土壤有机碳迁移规律。本研究将有助于丰富和完善侵蚀过程中土壤碳迁移机理,夯实土壤碳流失模型的理论基础,并为其提供必要的基础参数。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究野外径流小区设置在湖南省邵阳市水土保持科学研究所(111°22′ E, 27°03′ N),其位于湖南省衡(阳)邵(阳)盆地腹地,属于典型的湘中红壤丘陵地貌。区内地貌以丘陵、岗地为主,丘、岗形态多为圆丘状,呈珠状展布。研究区域内的地形平均坡度在 10° ~ 15°左右。海拔高度 231.2 m-276.6 m,相对高差 45.5 m。土壤以四纪红土发育的第四纪红壤为主,土层较深厚,土壤质地以砂壤、壤土为主。研究区处中亚热带湿润季风气候区,气候温暖、湿润、雨量充沛,年均气温 17.1℃,年均降水量 1 218 ~ 1 474 mm,无霜期 272 ~ 304 d。受地形、气象条件等因素影响,研究区降水集中,多发生在 4-9 月,区内多梯田和撂荒坡地,属于典型的红壤丘陵区。

1.2 试验设计与方法

在研究区坡耕地上进行三场不同雨强的模拟降雨试验,其中降雨小区坡度根据研究区实际确定为 10°,雨强在综合考虑研究区域近 5 年来降雨雨强变化状况后进行确定,研究中最终模拟降雨强度为 1.69 mm min^{-1}、1.31 mm min^{-1} 和 0.64 mm min^{-1},并分别表示为大、中、小雨强(下文相同)。

模拟降雨实验在 2011 年 7 月进行。在研究区域选择一块面积约为 5.0 m × 8.0 m 平均坡度约为 10°的坡耕地作为典型地块,实验前该坡耕地已撂荒 1 年,有少量杂草。在选定地块上沿坡面最大坡降方向设置 3 个彼此平行的 5.0 m × 2.0 m 临时径流小区。降雨试验前剪掉所有地上植被,并对径流区土壤耕层进行原位翻耕,然后耙匀整平。小区边界处用铁皮进行围合,铁皮插入地面约 20 cm,出露地表 15 cm。同时,将小区按顺坡方向平均分为 5 个部分,在每个部分按倒品字形进行 0 ~ 10 cm 土壤样品采集。在选定的地块上布置好径流小区,进行降雨强度互不相同的模拟降雨试验。大、中、小雨强降雨区的土壤有机碳含量分别为 7.34 ± 2.96、6.55 ± 1.99、7.68 ± 3.49 g kg^{-1},容重为 1.52 ± 0.12、1.69 ± 0.12、1.62 ± 0.19 g cm^{-3},砂粒 374.0 ± 19.4、382.0 ± 16.1、381.2 ± 24.8 g kg^{-1},粉粒 272.0 ± 35.4、264.0 ± 16.8、277.9 ± 29.3 g kg^{-1},黏粒 347.4 ± 26.9、354.0 ± 13.0、340.9 ± 21.9 g kg^{-1}。

人工模拟降雨器采用美国 Spraco 喷头,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%[9]。

模拟降雨试验按照率定试验结果进行降雨器的布设(如图 1)。大雨强使用四个降雨器,且布设方式相同,均是其中心离短边界统一为 25 cm,距长边界 20 cm,降雨器的压力均为 0.07 MPa。中雨强使用 3 个降雨器,其中两个位于降雨小区同一侧,降雨器离长、短边界 10 cm,另外一个降雨器位于另一侧中间,降雨器离长边界 20 cm,降雨器的压力均为 0.07 MPa。小雨强使用两个降雨器,降雨器离短边界为 25 cm,离长边界 20 cm,降雨器的压力均为 0.075 MPa。同时,各降雨区的顶部及两边共摆放 5 个雨量筒进行实际降雨强度监测。

降雨试验开始后,收集集水口的水沙,从降雨开始每 6 min 取一次水沙样,并测量径流量和泥沙量,降雨持续 1 h,降雨结束后继续取水沙样,测径流量直至断流,从而结束一个小区的模拟降雨试验。过滤降雨过程中所取的水沙混合样,所得泥沙风干、称重后,过 20 目和 100 目筛后进行有机碳的测定;所得的径流样加硫酸处理后立即测定其中有机碳的含量。

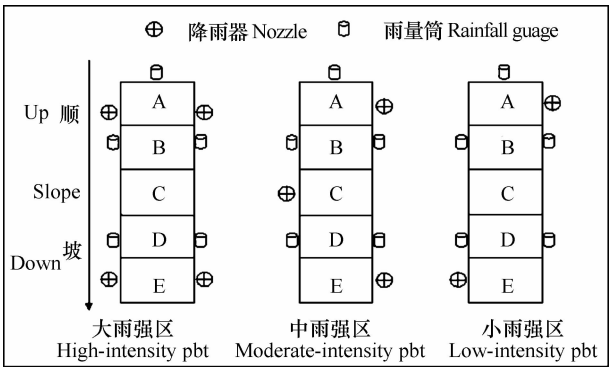

图 1　模拟降雨装置布设示意图

Fig. 1　Sketch of the apparatus layout for simulation of rainfalls

风干过筛后的土壤和泥沙采用油浴重铬酸钾外加热法测定其有机碳含量;过滤所得水样利用 TOC-TN 分析仪(日本岛津制作所生产)测定其有机碳含量;吸管法测土壤和泥沙机械组成。土壤容重采用环刀法测定。

1.3　数据处理

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 sigmaplot12.0 绘图软件作图。

2　结　果

2.1　模拟降雨基本特征

降雨及其在坡面产生的径流是坡面水土流失的原动力,因此降雨特征对泥沙及土壤有机碳迁移分布有重要影响。由表 1 可以看出,在相同坡度情况下,大雨强径流系数与中雨强相近,但明显大于小雨强。相关研究[14]表明,相同坡度下径流系数与降雨强度及降雨历时有关,径流系数在裸露土质条件下随着降雨强度的增大而增大,但存在阈值。大雨强和中雨强有径流系数相近,可能是由于雨强较大,降雨时间较长,而达到这个阈值。这一结果也符合该条件下径流系数的一般变化规律。而从降雨开始至坡面产生径流,各降雨区历时长短为中雨强(303 s) > 大雨强(267 s) > 小雨强(141 s)。原因是由于红壤黏粒含量较高,在降雨量较小的小雨强条件下,雨水与表层土壤充分反应、黏结而迅速形成薄薄一层结皮导致雨水入渗量较少而在土壤表层积蓄形成径流,产流时间相对较短;相对于小雨强,大雨强和中雨强降雨量较大,以雨滴溅蚀过程为主,入渗量相对较多,产流时间较长,且大雨强的溅蚀作用较中雨强条件下强,土壤颗粒分散度大并迁移明显而堵住土壤孔隙,产流时间会较中雨强短。

大、中、小雨强下径流含沙量平均为 0.14、0.10、0.06 kg L^{-1},随着降雨强度的增加而增加,并且径流总量、泥沙总量也均符合这一变化趋势。但大雨强径流量与泥沙量分别为中雨强和小雨强的 1.26 倍、3.37 倍和 1.71 倍、8.23 倍,随雨强的增大,泥沙总量相对径流总量增长倍数明显增大。这可能是雨滴初始动能随着雨强的增大而增强,而雨滴动能的增强不仅增加了土壤团聚结构的分散度和土壤扰动深度,而且降低了泥沙迁移启动所需的能量;同时,雨强的增大还使径流量明显增加,冲刷能力增强,这些机制综合作用使泥沙增长速率明显大于径流增长速率。

降雨过程中土壤坡面状况、降雨历时、径流系数等的变化与雨强关系不尽相同,但是影响土壤有机碳迁移的径流量和泥沙量的变化与雨强成正相关[15],雨强对泥沙和径流的产生、迁移均有重要作用。

表 1　降雨基本特性表

Table 1　Features of the rainfalls

降雨小区 Experiment plots	坡度 Slope gradient (°)	降雨强度 Rainfall intensity (mm min^{-1})	产流时间 Time producing runoff (s)	径流系数 Runoff coefficient	径流量 Runoff volume (L)	泥沙量 Sediment yield (kg)
大雨强区 High-intensity plot	10	1.69 ± 0.13	267	0.60	609.2	86.38
中雨强区 Moderate-intensity plot	10	1.31 ± 0.14	303	0.61	486.0	50.44
小雨强区 Low-intensity plot	10	0.64 ± 0.11	141	0.47	180.9	10.50

2.2 泥沙流失规律及其特征

泥沙作为土壤有机碳流失过程中的重要载体，承载着大量有机碳的流失[8,16]，控制泥沙流失成为水土保持的关键。如图 2 所示，从时间上来看，不同降雨强度下泥沙流失有相似规律：降雨过程前 42 min，泥沙流失量均呈现动态变化趋势，42 min 后进入稳定阶段，42 min 成为侵蚀变化过程的转折点。泥沙产量在大、中、小雨强条件下均遵循这一规律，因此雨强对泥沙产量稳定出现的时间几乎没有影响。而从流失量上看，不同降雨强度和不同侵蚀阶段下有各自的特点：大雨强泥沙流失量在经历急剧上升和缓慢增加的过程后开始下降，42 min 后进入稳定阶段，中雨强和小雨强泥沙流失量经历较缓的上升过程后直接进入稳定状态。这一现象的出现可能与不同侵蚀强度下降雨对土壤的不同作用有关。在大雨强 1.69 mm min^{-1} 的较高强度侵蚀下，土壤团聚体受到雨滴动能的击溅作用和破坏程度较大的消散作用，产生大量疏松的土壤颗粒，在入渗量趋向稳定并且径流量逐渐增加时，土壤颗粒的大量迁移导致泥沙量急剧增加，随着疏松的表层土壤逐渐减少，泥沙量会进入缓慢增长阶段；当径流量逐步稳定，坡面土壤结皮发育趋于完全以及疏松表层土壤耗尽后，泥沙量会逐渐减少；待坡面情况稳定以后，泥沙产量保持稳定水平。中雨强和小雨强条件下，土壤团聚体被分散程度较小，同时径流量偏小，冲刷能力较低，泥沙产量随着径流量的逐渐增加而缓慢上升；在径流量稳定和土壤结皮发育完全以后，泥沙产量保持稳定。此外，从图 2 中可以看出，大雨强和中雨强条件下，达到稳定时泥沙的产量相当，由此可以认为在一定范围的侵蚀强度下，坡耕地泥沙产量在稳定的状态下是一定的。

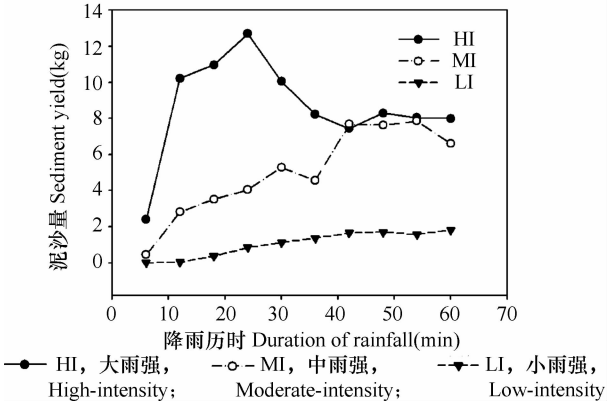

图 2 不同降雨时段的泥沙产量变化规律

Fig. 2 Variation of sediment yield with the processes of a rainfall event

因此，在坡度相同的情况下，降雨强度主要通过两种途径对泥沙迁移产生影响：(1)通过影响雨滴初始动能，对坡面土壤产生不同强度的扰动作用，产生不同深度的扰动层；(2)通过影响降雨在入渗量和坡面径流量之间的分配，对径流的剥蚀搬运能力产生作用，进而影响泥沙迁移。

侵蚀产沙的一系列过程受到土壤、坡面状况等诸多因素的影响，但径流的作用是不可忽略的。由此，本研究将侵蚀过程中不同时段的泥沙量和径流量进行了定量分析，分析发现泥沙径流立方拟合效果较为理想。如图 3 所示，大、中、小雨强下，泥沙量和径流量的立方拟合关系中确定系数 R^2 值分别为 0.713、0.856、0.996，p 值依次为 0.045 9、0.006 1、<0.000 1，均小于 0.05，达到显著和极显著水平。由此看出，泥沙量和径流量立方拟合相关性显著性水平随着降雨强度的增大而降低，其原因可能是雨强越大，径流量越大，粗泥沙被迁移的可能性就越大[17]，而粗泥沙的迁移容易受坡面状况等因素的影响，从而导致径流的影响作用相对变小。同时，从图中可以看出，大中小雨强下的径流大致分布在三个区间段，而每个区间段产沙量有不同的变化特征。径流产生量在 0 ~ 30 L 时，泥沙量随着径流量的增大而增大；在 40 ~ 60 L 时，大雨强和中雨强条件下，产沙量与径流量呈正相关，而且二者增长速率相似，但是明显高于前一阶段；在 60 ~ 70 L 时，随着径流量的增大，泥沙产量却逐渐降低。因此，在一定的范围内，泥沙量随着径流量的增大而增大，但存在一个阈值范围，超过这个范围，产沙量会随着径流量的增大而减少。

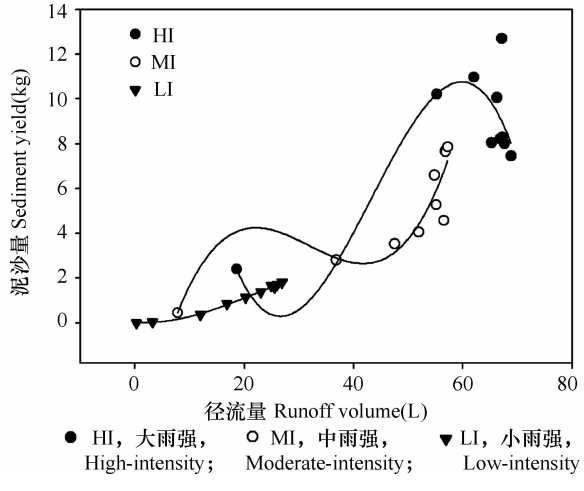

图 3 径流与泥沙的定量关系分析

Fig. 3 Quantitative relationship between sediment yield and runoff volume

2.3　不同降雨强度下泥沙和径流中有机碳的分布特征

土壤侵蚀严重影响了土地质量和作物生产力,不仅因为其造成了水土流失,更重要的是在这一过程中还伴随着大量土壤有机碳的损失。土壤有机碳通过溶解态和泥沙结合态两种形态随着径流和泥沙迁移而流失,二者有不同的流失规律。由表 2 可以看出,泥沙结合态有机碳(Sediment bounded organic carbon, SBOC)和总有机碳(Total organic carbon, TOC)流失量以及泥沙结合态有机碳在总有机碳流失量中所占比例均随着雨强的增大而增大,而径流溶解态有机碳(Runoff dissolved organic carbon, RDOC)流失量随雨强的变化规律却没有这种规律,这可能与原位土壤有机碳的垂向分布有关。同时,研究结果表明泥沙结合态有机碳在各雨强任一时段占总有机碳流失量百分比均在 84% 以上,最高达到 97.6%,占有绝对优势。因此,泥沙结合态是红壤坡耕地土壤侵蚀中有机碳流失的主要方式。

袁东海等[7]以浙江省兰溪市水土保持监督站的第四纪黏土发育的地带性红壤为研究对象,在自然降雨条件下对不同土地利用方式下的水土流失和有机碳流失特征进行研究后发现径流溶解态有机碳和泥沙结合态有机碳流失量基本接近,与本实验研究结果有差异。这可能与土壤类型、有机碳含量、耕作措施、降雨时间、降雨强度等特性相关。首先,土壤类型及其有机碳含量对流失的泥沙和径流中的有机碳起着决定性作用。本试验区内土壤为典型红壤,有机碳含量偏低,表层土壤碳平均含量为 6 ~ 8 g kg^{-1},并且试验区域年降雨量大,长期以来的淋滤作用会导致大量水溶性有机碳向下层迁移,致使该区域表层土壤水溶性碳含量偏低。其次,耕作方式对泥沙的迁移有很大影响。相对于免耕自然坡地,翻耕降低了土壤颗粒移动所需要的能量,泥沙迁移量明显增加,导致泥沙结合态有机碳流失量也相应增加。此外,降雨强度和降雨时间对有机碳流失方式也有显著影响。由于侵蚀土壤中水溶性有机碳含量一定,当径流量超过溶解这部分碳的临界值后,径流量的增加不会导致溶解态有机碳流失量的增加,但却能使泥沙量增长。因此,降雨强度的增加和降雨时间的延长会增加泥沙结合态有机碳在总有机碳流失量中的比例。

表 2　土壤有机碳流失特征

Table 2　Characteristics of the loss of soil organic carbon

降雨小区 Experiment plots	总有机碳流失量 TOC loss(g)	径流溶解态有机碳流失量 RDOC loss (g)	泥沙结合态有机碳流失量 SBOC loss (g)	泥沙结合态有机碳占总有机碳流失量百分比 SBOC loss/ TOC loss	
				变化范围 Variation range	平均值 Average
大雨强区 High-intensity plot	469.8	27.9	441.9	91.51% ~97.65%	94.07%
中雨强区 Moderate-intensity plot	356.9	39.3	317.6	84.55% ~93.17%	88.99%
小雨强区 Low-intensity plot	111.3	12.2	99.1	84.55% ~93.17%	89.07%

2.4　泥沙中有机碳富集特征

泥沙有机碳富集比是指泥沙中有机碳浓度与土壤有机碳浓度的比值,是泥沙中有机碳选择性迁移的一种表现形式。泥沙有机碳富集特征与泥沙量、泥沙来源以及土壤颗粒迁移机制有关。图 4 为不同降雨强度下侵蚀泥沙中有机碳富集比在不同侵蚀阶段的变化趋势,大、中、小雨强泥沙有机碳富集比的变化范围分别为 0.62 ~ 0.83、0.75 ~ 1.44、1.13 ~ 1.66,不同雨强下泥沙有机碳富集比出现显著不同变化特征,并可看出以下规律:(1)泥沙有机碳富集比随着降雨强度的增大而减小;(2)泥沙有机碳富集比在小雨强和中雨强条件下随着时间的推移逐渐下降,而在大雨强下却呈现明显的波动趋势;(3)在整个降雨过程中,小雨强泥沙有机碳富集比均大于 1,大雨强均小于 1,中雨强变化较大,降雨前 36 min 大于 1,之后小于 1。一般情况下,降雨强度较小时,含碳量高、比重较小的颗粒迁移所需能量较低,能够优先迁移,在这种条件下,土壤颗粒大小是影响土壤碳富集的主导因素;而在降雨强度增大后,泥沙大量迁移使得土壤颗粒迁移机制的作用减小,泥沙的稀释作用成为影响有机碳富集的主要因素,有机碳富集比较小。因此,降雨强度深刻影响着泥沙及有机碳的迁移。

相关研究表明黏粒的富集能够引起碳的富集,

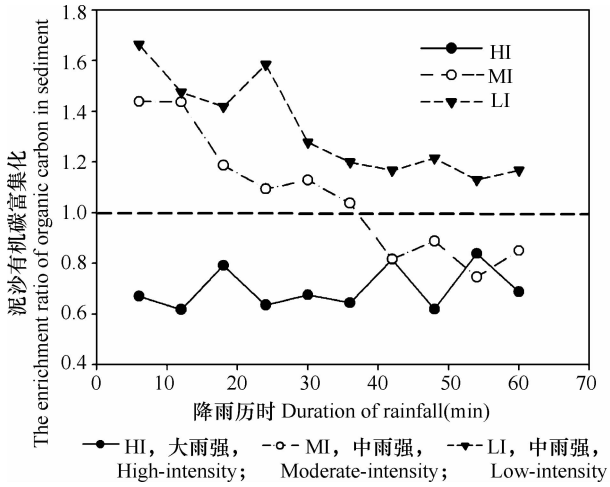

图 4 泥沙中有机碳富集特征

Fig. 4 Characteristics of organic carbon enrichment in sediments

因为黏粒有较大的表面积，能够保持大量有机碳[18]。黄昌勇[19]认为土壤有机碳能够与黏粒和矿物阳离子紧密结合，并以有机无机复合体形式存在于土壤中，52% ~98% 土壤有机碳集中在黏粒部分。因此，黏粒的富集可能是泥沙有机碳富集的原因之一。本研究发现，泥沙有机碳富集与黏粒富集密切相关，但降雨强度对二者的相关性有较大影响。图 5 为大、中、小雨强下泥沙黏粒富集比和有机碳富集比相关性检验结果，三种雨强下两指标间的确定系数 R^2 分别为 0.116、0.966、0.625，p 值分别为 0.335

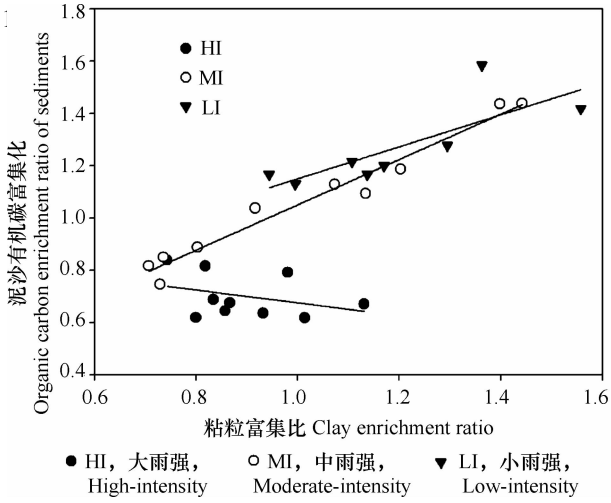

图 5 泥沙黏粒富集比与有机碳富集比相关性

Fig. 5 Relationship between clay and organic carbon in enrichment ratio in sediment

可以看出，大雨强下，泥沙有机碳富集比随着黏粒富集比的增大而呈下降趋势，并且泥沙黏粒富集比与有机碳富集比相关性不能通过显著性检验，而在中雨强和小雨强条件下则表现出显著正相关性。大雨强条件下，黏粒和有机碳的富集比几乎均小于 1，在这一过程中泥沙大量迁移，泥沙的稀释起了关键作用；中、小雨强条件下，泥沙碳富集与黏粒富集分别呈现显著、极显著的正相关性，这可能是因为在相对偏小雨强下径流量、流速等条件对土壤黏粒的迁移具有高度的选择性，在泥沙颗粒碳含量保持绝对优势的情况下，泥沙黏粒富集引起了有机碳的富集；同时小雨强泥沙有机碳富集比均大于 1，这可能是因为小雨强产生的径流运移能力较弱，含碳量高且较轻的微小土壤颗粒及游离态腐殖质成为泥沙碳的主要来源，泥沙颗粒碳含量虽然相对较高，但是绝对量却是较低的，因而较中雨强其相关性会有所降低。

3 讨 论

侵蚀作用下土壤有机碳以泥沙结合态和径流溶解态两种形式流失，其中前者是土壤有机碳流失的主要方式[20]。这与不同形态有机碳的特性有关。泥沙结合态碳主要为惰性有机碳，在土壤中比较稳定，含量高；而溶解态有机碳也称水溶性有机碳（Dissolved organic carbon, DOC），属于活性有机碳，容易被植物和微生物利用，含量较低。van Hemelryck 等[21]认为活性有机碳在土壤总有机碳中的比例平均为 9%，而非活性碳所占比例为 90% 左右，同时考虑到非水溶性的活性有机碳和淋滤过程中损失的部分，随径流流失的有机碳就少之又少。与许多研究的结果一致[8,22]，本研究结果表明，泥沙迁移是土壤有机碳的主要流失方式，泥沙结合态有机碳流失量占到总有机碳流失量的 84% 以上。因此，泥沙迁移导致的有机碳流失成为研究的重点，国内外研究者对此已进行了诸多研究[23-25]。泥沙迁移过程中受到的影响因素众多，但其中最重要的是径流量、流速以及泥沙粒径[17]。本研究结果表明，在相同坡度下，泥沙量与径流量的立方拟合关系良好，6 min 径流产生量小于 60 L 时，泥沙随径流量的增加而增加，增长速率也逐渐增大；在大于 60 L 时，泥沙量随着径流量增大而减少。王全九等[26]认为侵蚀过程中，土壤在雨滴打击和径流冲刷作用下存在一定厚度的扰动层，并称之为“混合层”，混合层土壤相对于非扰动层较容易迁移。在混合层土壤被迁移殆尽后，尽管径流量还在增加，径流量的增加也使径流流速加大[27]，径流的动能增大，搬运能力增

加,但可供搬运的泥沙却在逐渐减少,泥沙量也会逐渐减少。

泥沙是土壤有机碳流失的重要载体,不同降雨强度下,泥沙结合碳随泥沙迁移特征的变化而变化。本研究结果表明,小雨强下泥沙有机碳富集比最高,大雨强最低,这与 Polyakov 和 Lal[11] 及 Schiettecatte[28] 等的研究结果相一致。Jackson 和 Massey[29] 认为泥沙碳的富集是土壤有机碳选择性迁移的表现形式,是质量较轻、有机碳含量较高的土壤颗粒在一定的径流运输作用下优先迁移的结果。雨滴的击溅作用,快速湿润导致的消散作用以及径流流动对土壤颗粒的剪切作用等能够使富含碳、氮等的土壤团聚体外层被分散开,而外层被分散的土壤团聚体质量较轻,迁移过程中的优先性比较明显[30]。雨强较小时,径流量和流速较小,径流运移能力相对较弱,能够明显地将质量小的土壤颗粒优先分离出来;雨强较大时,径流运移能力极大增加,泥沙大量被迁移,土壤大团聚体和大颗粒同样被迁移,较高的泥沙输移比减弱了侵蚀的选择性迁移能力。本研究中,泥沙有机碳富集比随着雨强改变而显著变化,降雨强度成为影响泥沙有机碳富集比的重要因素。此外,相关研究表明泥沙有机碳的富集与黏粒的选择性迁移有关,从而认为有机碳富集的主要影响因素为地面径流的运移能力[31]。但本研究发现,中雨强和小雨强下,泥沙有机碳富集比与黏粒富集比有显著正相关;大雨强条件下,两者之间的相关性较小,这可能与降雨的特性有关。大雨强下雨滴动能及径流流速较大,对土壤颗粒产生的溅蚀作用和剪切作用相应地增强,表层土壤团聚体破坏更加严重,表面富集有机碳的黏粒分离也相应增多。小雨强下,径流运移能力较弱,仅能搬运有机碳含量高的游离腐殖质以及较小的团聚体,黏粒富集程度不如中雨强。中雨强条件下,雨强适中,黏粒的分离与迁移均有明显的优先性,而黏粒周围吸附着丰富的有机碳[26],因此,黏粒与有机碳的富集有极显著的正相关性。

4　结　论

研究结果表明,红壤丘陵区土壤侵蚀过程中泥沙与有机碳流失量随着降雨强度的增强而增大,径流是影响泥沙流失的重要因素,其相关程度随着雨强的增大而降低。侵蚀过程中有机碳主要以泥沙结合态形式流失,泥沙结合态有机碳流失量占总有机碳流失量的 84% 以上,最高达到 97.6%;径流溶解态有机碳流失量在总有机碳流失量中比例较小。泥沙有机碳富集比随着雨强的增大而减小,与黏粒富集比显著相关,具有选择性迁移的特征,且雨强越小,选择性迁移越明显。总之,雨强的变化引起了雨滴动能和径流剥蚀能力的改变,进而影响径流量以及坡面状况而对泥沙及有机碳的迁移分布产生影响。

参 考 文 献

[1] Bertol I, Engel F L, Mafra A L, et al. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 142—150

[2] Kuhn N J, van Oost K, Cammeraat E. Soil erosion, sedimentation and the carbon cycle Preface. Catena, 2012, 94:1—2

[3] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. Environment International, 2003, 29(4): 437—450

[4] Smith S V, Renwick W H, Buddemeier R W, et al. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(3): 697—707

[5] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Ecology-Managing soil carbon. Science, 2004, 304(5669): 393—393

[6] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 6—7

[7] 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

[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. 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

[9] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系. 土壤学报, 2012, 49(3): 465—473. Zhang X, Li Z W, Shen W P, et al. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and their quantitative relationships with sediment and runoff generation (In Chinese). Acta Pedologica Science, 2012, 49(3): 465—473

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

[11] Polyakov V O, Lal R. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. Soil Science, 2004, 169(8): 590—599

[12] Wang Z G, Govers G, Steegen A, et al. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cul-

tivated area. Geomorphology, 2010, 124(1/2): 65—74

[13] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Marques M J. Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. Soil & Tillage Research, 2011, 117: 211—223

[14] 张强, 郑世清, 田风霞, 等. 黄土区被草土质路面产流产沙过程及防蚀效果. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1785—1791. Zhang Q, Zheng S Q, Tian F X, et al. Runoff and sediment processes and anti-erosion effects of grass-covered earth road in loess hilly region (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1785—1791

[15] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85—90. Li G, Huang G B. Effects of rainfall intensity and land use on soil and wate loss in loess hilly region (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 85—90

[16] 李光录, 赵晓光, 吴发启, 等. 水土流失对土壤养分的影响研究. 西北林学院学报, 1995, 10(增): 28—33. Li G L, Zhao X G, Wu F Q, et al. The effects of soil and water losson soil nutrients (In Chinese). Journal of Northest Forestry College, 1995, 10(S1): 28—33

[17] 韩浩. 坡面降雨径流泥沙起动规律初步研究. 陕西杨凌:西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 2010. Han H. Sediment incipient motion of rainfall runoff on sloping land (In Chinese). Yangling, Shaanxi: College of Water Resource and Architectural Engineering , Northwest A & F University, 2010

[18] Zinn Y L, Lal R, Bigham J M, et al. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: Texture and mineralogy. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1204—1214

[19] 黄昌勇. 土壤学. 北京:中国农业出版社, 2000:39—40. Huang C Y. Pedology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000:39—40

[20] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增): 170—176. Chen L, Li Z B, Li P, et al. The coupling effect on soil erosion and nutrient lost under a simulated rainfall (In Chinese). Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(S1): 170—176

[21] van Hemelryck H, Fiener P, van Oost K, et al. The effect of soil redistribution on soil organic carbon: An experimental study. Biogeosciences, 2010, 7(12): 3971—3986

[22] 刘秉正, 李光录, 吴发启, 等. 黄土高原南部土壤养分流失规律. 水土保持学报, 1995, 9(2): 77—86. Liu B Z, Li G L, Wu F Q, et al. The regular patterns of the loss of soil nutrients on southern Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 77—86

[23] 韩玉国, 李叙勇, 段淑怀, 等. 水土保持措施对径流泥沙及养分流失的影响. 中国水土保持, 2010, 12(12): 34—36, 73. Han Y G, Li X Y, Duan S H, et al. Influence of soil and water conservation measures to runoff sediment and nutrient loss (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2010, 12(12): 34—36, 73

[24] 罗细芳, 姚小华. 垦耕地经济林模式泥沙流失与降雨因子的灰色关联研究. 经济林研究, 2004, 22(4): 12—14. Luo X F, Yao X H. Study on bedload and rain factors by Gray Systematical Theory (In Chinese). Economic Forest Researches, 2004, 22(4): 12—14

[25] Kostadinov S, Dragovic N, Todosijevic M. Estimating soil erosion and sediment transport in the drainage basin of the proposed Selova Reservoir, Serbia. Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems, 2006, 306(6): 104—109

[26] 王全九, 王力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 109—114, 119. Wang Q J, Wang L, Li S Q. Research on the effective factors of nutrient transfer and loss in the slope land (In Chinese). Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(12): 109—114, 119

[27] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 等. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究. 水土保持学报, 2007, 21(6): 35—38. Fan H M, Wang T L, Zhou L L, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 35—38

[28] Schiettecatte W, Gabriels D, Cornelis W M, 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

[29] Jackson M, Massey H. Selective erosion of soil fertility constituents. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16(4): 353—356

[30] Ghadiri H, Rose C. Sorbed chemical transport in overland flow: I. A nutrient and pesticide enrichment mechanism. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(3): 628—633

[31] Weigand S, Schimmack W, Auerswald K. The enrichment of ^{137}Cs in the soil loss from small agricultural watersheds. Zeitschrift für Pflanzenern ? hrung und Bodenkunde, 1998, 161(4): 479—484

EFFECT OF RAINFALL INTENSITY ON SOIL LOSS FROM SLOPE FARMLAND OF RED SOIL AND ORGANIC CARBON ENRICHMENT IN SEDIMENT

NieXiaodong[1,2]　Li Zhongwu[1,2†]　Wang Xiaoyan[3]　Shen Weiping[4]　Zhang Xue[1,2]　Guo Wang[1,2]
Ma Wenming[1,2]　Wang Shuguang[4]

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

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

(3 College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science&Technology, Changsha 410076, China)

(4 *Institute of Soil and Water Conservation of Shaoyang*, *Shaoyang*, *Hunan* 422000, *China*)

Abstract　Simulated rainfalls, 1.69 mm min^{-1}(high), 1.31 mm min^{-1}(moderate) and 0.64 mm min^{-1}(low) in intensity, were performed on plots of farmland, 2 m×5 m each in area and 10° in average slope gradient, on a red soil hill typical of hilly regions, to study on rules of migration, of sediments and enrichment of organic carbon therein. Results show that soil loss increased with rainfall intensity, and demonstrated a significant cubic relationship with volume of runoff, which is an important factor influencing soil loss on slope farmland; Sediment-bonded soil organic carbon is the mainly form of organic carbon lost with runoff, accounting for more than 84% and even 97.6% of the total loss of organic carbon. Organic carbon enrichment ratio of the sediments decreases gradually with increasing rainfall intensity, and selective migration of organic carbon was more evident in rainfalls low in intensity. In rainfalls, high in intensity, no significant linear relationship was observed between organic carbon enrichment ratio and clay enrichment ratio, but in rainfalls, moderate or low in intensity, an extremely significant or significant positive relationship was observed, respectively. Therefore, it can be concluded that rainfall intensity is an important factor that affects soil loss and migration of organic carbon with sediments.

Key words　Rainfall intensity; Slope farmland; Sediment; Organic carbon; Enrichment ratio

(责任编辑:卢　萍)