

自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移*

肖胜生^{1, 2} 汤崇军^{1, 2} 王凌云¹ 段 剑^{1, 2} 杨 洁^{1, 2†}

(1 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029)

(2 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

摘 要 依托江西水土保持生态科技园, 2015年3月—8月期间, 对裸地、草地、果园和湿地松人工林四种类型径流小区自然降雨条件下侵蚀过程中径流泥沙和土壤有机碳的流失特征进行了原位监测。结果表明, 监测期间24场降雨下, 径流系数和侵蚀模数基本上均随雨型的增大而增加。随着土地利用类型由裸地向果园、草地和林地的转换, 减流效益和减沙效益依次增大。径流量和泥沙流失量最主要的影响因素分别是降雨量和径流量。裸地、草地、果园和林地四种类型坡面上, 自然降雨下土壤有机碳随泥沙迁移的比例分别为64.67%、47.38%、53.94%和36.03%, 碳流失强度分别达到560.3、1.98、122.5和2.66 mg m⁻²。径流有机碳含量与径流量之间、泥沙含碳量与泥沙量之间均呈负相关关系。裸地、果园、草地和林地四种径流小区泥沙有机碳富集比分别为1.27、1.10、0.80和0.58, 即随着土壤侵蚀模数的降低, 有机碳富集比也减小。泥沙有机碳富集比均随雨强的增大而减小, 有机碳的选择性迁移在低强度降雨条件下表现更为明显。

关键词 自然降雨; 水力侵蚀; 土壤有机碳; 红壤坡面; 富集比

中图分类号 S156.3 **文献标识码** A

在坡面或流域尺度上, 土壤碳库均受到水力侵蚀的重要调控^[1]。鉴于土壤有机碳在维持全球碳素平衡^[2]和农业可持续发展^[3]上的重要地位, 土壤有机碳的侵蚀损失受到普遍关注。

诸多研究结果表明, 地表径流驱动下碳素迁移规律主要受降雨特征、地形条件、土壤性质、肥料用量、耕作方式、地表覆盖、土地类型及利用方式等多种因素影响, 其中雨强、径流量和侵蚀泥沙量是主要影响因素^[4-6], 如Ma等^[6]模拟降雨试验得到降雨强度是土壤有机碳(SOC)及可溶性有机碳(DOC)横向迁移的主导因子, 在耕作方式与雨强的综合影响下DOC和SOC输出浓度表现为免耕强降雨>免耕小降雨>翻耕小降雨。坡地有机碳的选择

性迁移(指随着泥沙迁移或随着径流迁移)呈现为泥沙结合态有机碳或径流溶解态有机碳, 在不同降雨、地形和土地利用方式条件下有所不同^[7-8]。摸清有机碳迁移的选择性是针对性防治有机碳侵蚀损失的前提。

侵蚀泥沙具有碳素富集的特性, 但泥沙富集比受到诸多因素的影响, 如Jacinthe等^[9]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^[10]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^[11]以及土壤类型等^[12]也被认为与有机碳富集比密切相关。

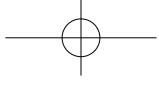
南方红壤丘陵区是全国土壤侵蚀严重的地区之

* 国家自然科学基金项目(41303064)、公益性行业(水利)科研专项(201501047)和江西省水利科技重大研究项目(KT201417)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41303064), the Special Fund for Water Resources Research in the Public Interest (No.2014BAD15B0303) and the Major Research Projects of Water Resources Department of Jiangxi Province (No. KT201417)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zljy@126.com

作者简介: 肖胜生(1981—), 男, 湖北省英山县人, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系研究。E-mail: xss19811213@163.com

收稿日期: 2016-10-13; 收到修改稿日期: 2016-12-02; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-12-23



一。充沛的降雨产生的较大坡面径流是侵蚀发生和发展的主要动力，由其导致的土壤和有机碳的流失已引起了较多关注^[6, 12-15]。但总体上，相关学者对坡地径流碳素运移的研究多以短历时的模拟降雨试验为主，缺少自然降雨条件下的野外原位定量监测，而自然降雨下的原位监测由于观测场次较多、涉及不同雨型的变化以及野外小区面积较大等原因，研究结果更能说明有机碳侵蚀损失的真实性和准确性。此外，目前相关研究主要关注坡耕地的碳素侵蚀损失，缺乏不同土地利用方式的对比研究，这不利于评估水土保持生态建设对碳循环的影响及其在应对气候变化方面的地位和贡献。因此，本研究通过对不同土地利用方式下的径流小区进行自然降雨条件下的原位监测，研究径流量、泥沙流失量及其携带有机碳之间的相互关系，阐明有机碳迁移损失对降雨特征、水土流失和土地利用变化的响应特征，深化土壤侵蚀与碳循环相互关系的科学认知，并为调控红壤区有机碳损失、增强土壤固碳能力和维持土壤肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省德安县江西水土保持生态科技园（115°42′38″~115°43′06″E、29°16′37″~29°17′40″N）。科技园属于国家级水土保持示范园区，海拔30~90 m，坡度5°~12°，典型的亚热带湿润季风气候，年均气温16.7℃，多年平均降雨1 469 mm。降雨年内分配不均，4~7月降雨量占总降雨量的50%~60%。土壤主要为第四纪红黏土发育的红壤，土层厚度平均达到1.5 m。科技园位于我国红壤的中心区域，属全国土壤侵蚀二级类型区的南方红壤区，在南方红壤区具有典型性。原有地表土壤遭受严重侵蚀，土壤肥力急剧减退，具有酸、黏、板、瘦等特点。经历长时期水土保持生态建设后，科技园整体生态景观发生显著变化，除保留部分裸露坡面之外，土地利用类型主要有人工草地、灌丛、柑橘（*Citrus reticulata* Blanco）果园以及湿地松（*Pinus elliottii*）人工林和杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工林等。

1.2 径流小区设置

在侵蚀退化裸地以及在裸地上逐步治理恢复的百喜草（*Paspalum notatum* Flugge）地、

柑橘园和湿地松人工林4种植被类型上建立径流小区，每种植被类型各设立3个小区，坡度均为10°。其中裸地、果园和林地小区宽5 m（与等高线平行），长20 m（水平投影）；草地小区宽5 m（与等高线平行），长15 m（水平投影）。为阻止地表径流进出，在每个小区的周边设置围埂。小区下面修筑集水槽承接小区径流泥沙，并通过聚氯乙烯（PVC）管引入径流池（其中湿地松小区是径流桶）。

侵蚀裸地为植被恢复前的对照，属强度土壤侵蚀，土壤B层出露，地表偶见结皮。百喜草地和柑橘果园在治理前均为A层土壤流失殆尽，B层出露，本底条件相似，治理起始时间均在2000年。其中，百喜草园均匀撒播形成，现盖度达到95%，草皮平均高度约为40 cm；果园按照1 335株 hm⁻²的初始密度栽植，每个径流小区现有12株柑橘，胸径、树高和冠幅平均值分别为7.6 cm、2.8 m和1.2 m，覆盖度为30%；湿地松林栽植至今已有30 a的时间，胸径和树高分别达到20 cm和15 m，林下植被盖度达85%，林间偶见木荷（*Schima superba*）、黄端木（*Adinandra millettii*）和铁芒萁（*Dicranopteris dichotoma*）等植物。径流小区表层（0~20 cm）土壤基本性质见表1。

1.3 研究方法

径流小区旁建有固定雨量监测点，采用虹吸式自计雨量计记录大气降水过程，以此量算降雨量、降雨历时和降雨强度等。

在裸地、草地和果园三种小区下建有径流池，湿地松人工林径流小区安装有镀锌铁皮制径流桶。径流池：根据当地可能发生的次降雨最大径流量设计成A、B和C三个径流池（1.0 m×1.0 m×1.2 m），并通过五分法薄壁三角分流。径流池装有QYSW-301型自记水位计（清远测控技术有限公司，西安），并通过搪瓷水尺校正。根据自记水位计记录、水池面积和三角堰出水高度，以一次降雨过程为单位，测定逐次降雨的径流历时和径流量。径流桶：根据次降雨最大径流量，采用分流桶+集流桶一级分流的方式收集径流量。分流桶和集流桶均采用镀锌铁皮制成，桶顶部加设盖板，底部设排水阀。内部有效直径设置为60 cm，高度为70 cm，其中分流孔孔底高度0.5 m，集流桶进水孔孔底高度0.5 m。为减小分流误差，分流孔的数量设置为5个，孔径大小均为4 cm。为保证分流均匀，分流孔



表1 径流小区表层（0~20 cm）土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the surface soils (0~20 cm) in the plots							
样地 Plots	pH	容重Bulk density (g cm ⁻³)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (mg kg ⁻¹)
裸地Bare land	5.90 ± 0.19a	1.53 ± 0.05a	0.66 ± 0.07a	0.31 ± 0.03a	14.19 ± 1.06a	6.08 ± 0.34a	150.9 ± 19.0a
草地 Grassland	5.78 ± 0.16a	1.41 ± 0.03a	0.72 ± 0.08a	0.32 ± 0.03a	13.84 ± 0.96a	10.71 ± 0.47b	376.2 ± 54.2b
果园 Orchard	6.23 ± 0.19a	1.55 ± 0.05a	0.97 ± 0.10b	0.38 ± 0.05a	14.34 ± 1.12a	7.35 ± 0.35b	400.0 ± 46.6b
林地 Forest land	6.27 ± 0.21a	1.38 ± 0.03a	1.03 ± 0.10b	0.45 ± 0.06a	15.26 ± 1.26a	15.52 ± 0.66b	745.3 ± 124.4c

注：土壤采样时间为2015年1月。数据为平均值 ± 标准偏差，n=3。同一列中不同小写字母表示不同小区之间该指标在0.05水平上存在显著差异 Note: Soil sampling was carried out in January 2015. Data are mean ± SD, n=3; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between plots (p < 0.05)

为圆形，间距均为10 cm；孔均匀排列，沿坡向在同一水平线。选择中间一孔将分流量引入集流桶中。

每次产流后，将径流池或径流桶中泥水充分搅拌，分上、中、下3层取样混合，再从中取出1 000 ml浑水样，室内烘干求得泥沙含量，将其乘以径流量即可得出此次降雨的土壤侵蚀量。因四种类型径流小区中，裸地具有最大的径流量和泥沙流失量。因此在本文中将裸地的径流量减去其他三种类型小区的径流量，差值与裸地径流量的比值即为减流效益；同理，其他三种类型小区泥沙流失量与裸地泥沙流失量的差值与裸地泥沙流失量的比值为减沙率。

土壤有机碳（SOC）测定：采用油浴重铬酸钾外加热法测定；径流液中可溶性有机碳（DOC）测定：测量完径流量后，取径流液100 ml存放于4℃冰箱中静置，将上清液倒出，4 000 r min⁻¹离心10 min，之后浸提液用玻璃纤维滤膜（0.45 μm）与真空泵抽滤后，使用总有机碳分析仪（Elementar元素分析系统，德国）直接测定滤液中的有机碳含量；泥沙中有机碳测定：每次降雨结束后，过滤流失泥沙，所得泥沙风干、称重后，过20目和100目筛后采用重铬酸钾外加热法进行有机碳的测定。

1.4 数据分析

泥沙中有机碳富集比：3月—8月监测期间，每

个月测定一次坡面表层土壤（0~20 cm）中有机碳含量作为该月份土壤有机碳含量背景值。将每次降雨后侵蚀泥沙中有机碳浓度除以有机碳含量背景值得到泥沙有机碳富集比。

碳流失模数：考虑到不同土地利用类型径流小区面积不一致（裸地、果园和林地均为100 m²，草地仅有75 m²），本研究中以小区范围内有机碳流失总量（径流中有机碳+泥沙中有机碳）除以小区面积转换为单位面积有机碳流失量，定义为碳流失模数，单位为g m⁻²。

采用Microsoft Excel 2007和SPSS 14.0统计软件进行数据分析。

2 结 果

2.1 研究区自然降雨特征

降雨是坡面水力侵蚀的源动力，与坡面产汇流、产输沙以及有机碳输出存在密切关系。参考气象部门24小时降雨量标准判别降雨等级，研究区2015年3月4日—8月27日24场次降雨的雨型为小雨1场，中雨和大雨均为9场，暴雨有4场，大暴雨1场。降雨量和降雨强度变化曲线图（图1）表明，降雨量变化较大，雨强的变化无明显规律，既有短历时强降雨事件（如7月24日那场降雨，降雨量达到146.5 mm，降雨历时仅有725 min，因此雨强达

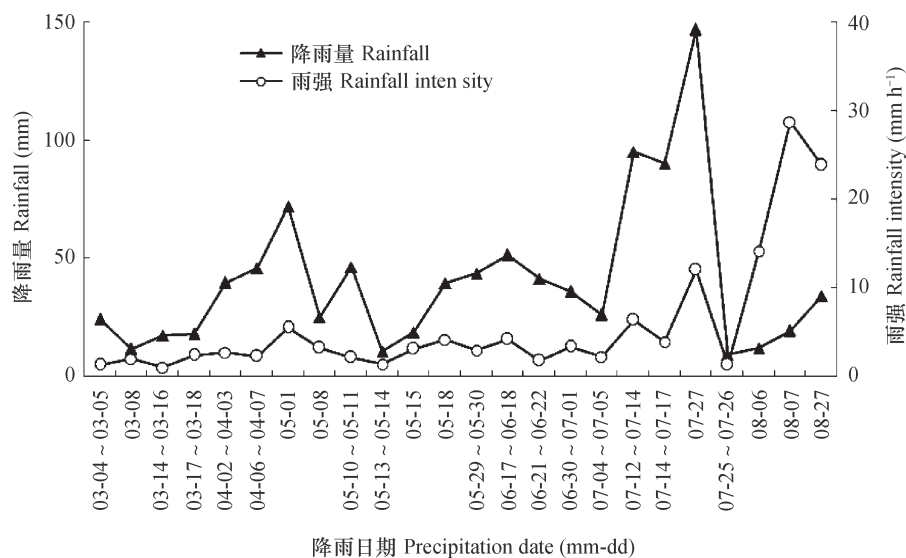


图1 各场次降雨量和降雨强度

Fig. 1 Rainfall and rainfall intensity of the 24 rainfall events

到 11.96 mm h^{-1} ，属于大暴雨事件），更多的是长历时弱降雨事件。

2.2 自然降雨不同土地利用下径流泥沙流失特征

研究期间不同类型径流小区地表径流量监测结果表明，除少数几场降雨草地径流量很低不能进行测量之外，多数情况下不同类型小区产流差异非常明显。为了消除径流小区面积不同的影响，本研究不比较径流量，而以径流深和径流系数来比较不同类型小区的产流差异。监测期间，裸地的径流深远远高于另三种类型小区，草地与林地之间无明

显差异（图2）。与裸地相比，林地、草地和果园的减流效益分别达到98.98%、98.85%和68.56%，说明植树种草和果业开发等水土保持生态建设活动的保水作用明显。柑橘果园小区减流效益不明显，主要是因为实行了清耕处理，缺乏地被层，同时还存在大量的株间空隙和株内空隙（植被覆盖度只有30%），其减流效益主要得益于柑橘树的冠层截留作用^[16]。此外，研究结果还显示，随着雨型从小到大的变化，径流系数也依次在增大，这种变化规律在四种土地利用类型下均得到体现（表2）。

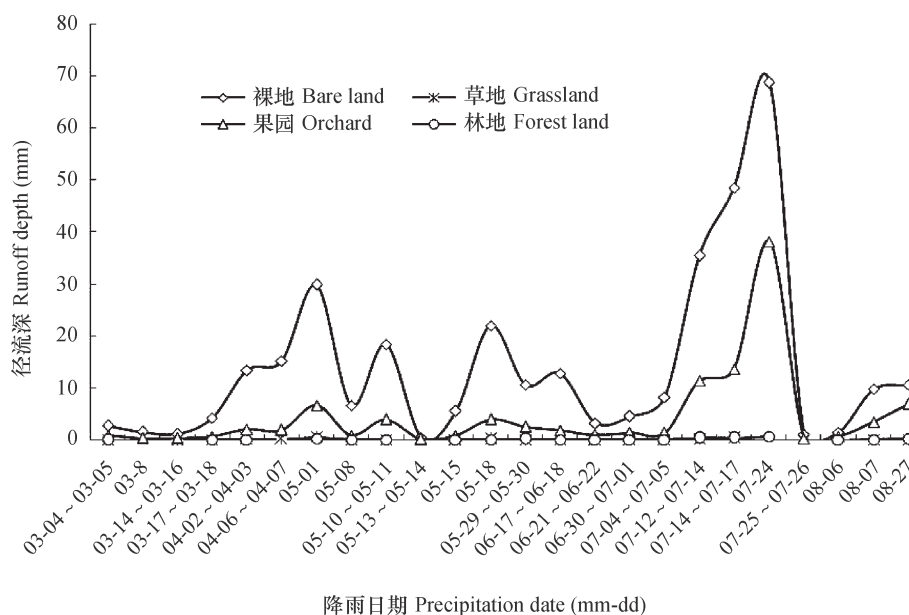


图2 不同类型径流小区径流深

Fig. 2 Runoff depth relative to plot

<http://pedologica.issas.ac.cn>

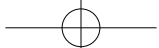


表2 不同类型径流小区径流系数和侵蚀模数对雨型的响应

Table 2 Response of runoff coefficient and erosion modulus to rainfall types in different plots

	裸地Bare land		草地Grassland		果园Orchard		林地Forest land	
	径流 系数 ^①	侵蚀 模数 ^② (t km ⁻²)	径流 系数 ^①	侵蚀 模数 ^② (t km ⁻²)	径流 系数 ^①	侵蚀 模数 ^② (t km ⁻²)	径流 系数 ^①	侵蚀 模数 ^② (t km ⁻²)
小雨Light rain (1)	12.25%	1.78	0.02%	—	2.95%	0.27	0.00%	—
中雨Moderate rain (9)	20.22%	13.71	0.53%	—	5.34%	2.76	0.23%	0.06
大雨Heavy rain (9)	30.37%	44.39	0.31%	0.14	7.41%	9.59	0.31%	0.09
暴雨Rainstorm (4)	39.62%	147.0	0.49%	0.20	10.08%	21.04	0.42%	0.14
大暴雨Heavy downpours (1)	46.95%	643.0	0.56%	0.59	26.07%	150.7	0.47%	0.32

注：降雨类型后括号中数据为监测期间降雨场数 Notes: The data in brackets after the rain type is the rainfall time during the monitoring period. ①Runoff coefficient, ②Erosion modulus

研究结果表明，监测期间不同类型径流小区的产沙特征存在明显差异。24场降雨对裸地而言均是侵蚀性降雨，侵蚀模数平均73.15 t km⁻²。果园下仅有3场降雨无泥沙流失，侵蚀模数均值为14.90 t km⁻²。草地和林地径流小区较难产生泥沙流失，即使是7月24日大暴雨事件草地和林地小区也仅有0.05 kg和0.03 kg的产沙量（而裸地和果园小区分别达到64.00 kg和15.00 kg），并且9场中雨草地小区均无泥沙流失，监测期内侵蚀模数平均仅有0.20和0.12 t km⁻²。与裸地相比，草地、果园和林地的减沙率分别为99.73%、79.63%和99.84%，植被的覆盖和水土保持措施能较大程度地抑制土壤侵蚀活动，对地表土壤资源起到了良好的保护作用。此外，研究结果还显示，随着雨型从小到大的变化，四种类型径流小区的侵蚀模数依次在增大（表2）。

单因素方差分析表明，影响径流量的主要因素为降雨量。各试验区径流量和降雨量的相关关系均为正相关关系，相关系数为0.89~0.92，达到极显著水平（ $p<0.001$ ）。影响泥沙流失量的主要因素为降雨量和径流量。泥沙流失量与降雨量和径流量之间均达到显著的正相关关系（ $p<0.05$ ）。泥沙流失量和降雨量的相关系数为0.81~0.88，泥沙流失量与径流量的相关系数为0.95~0.98。径流量与土壤流失量之间的关系较降雨量与土壤流失量之间关系更为密切，说明径流是泥沙流失的最主要载体，径流的多少对泥沙流失量起着最终决定作用。此外，草地、果园和林地三种情况下其产流、产沙

与降雨强度之间均不存在显著的相关关系，但是裸地的产流、产沙与降雨强度的相关关系均达到显著水平，而且其相关性均大于降雨量因素。

2.3 有机碳随地表径流的损失

由于径流量偏低无法取样等原因，裸地和果园下有24场监测数据，而草地和林地则分别仅有20场和19场降雨数据。裸地、草地、果园和林地四种类型下径流中有机碳浓度的变化范围（括号内为均值）分别为：3.26~8.56 mg L⁻¹（5.00 mg L⁻¹）、5.00~12.64 mg L⁻¹（7.68 mg L⁻¹）、3.16~10.48 mg L⁻¹（6.11 mg L⁻¹）、6.36~15.56 mg L⁻¹（10.02 mg L⁻¹）。不同径流小区有机碳径流损失的差异主要是土壤中可溶性有机碳（DOC）含量的差异引起的，如表1所示，草地、柑橘园和湿地松林表层0~20 cm土壤中DOC含量分别是裸地的2.49倍、1.06倍和1.91倍。

方差分析进一步表明（表3），除了裸地之外，草地、果园和林地三种类型小区径流有机碳浓度与雨强均呈现显著的负相关关系，但四种类型小区径流携带有机碳浓度与径流量之间均表现出显著的负相关。这可能是由于径流量逐渐增大时，细颗粒土壤大部分已流失，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。

2.4 有机碳随泥沙迁移的损失

由于泥沙量偏低无法取样等原因，裸地下有24场降雨数据，而草地、果园和林地则分别仅有9场、21场和17场。裸地、草地、果园和林地小区

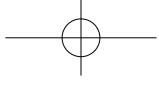


表3 不同类型径流小区下雨强和径流量对有机碳流失浓度的影响（方差分析结果）

	裸地Bare land		草地Grassland		果园Orchard		林地Forest land	
	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
雨强Rainfall intensity	0.119	-0.327	0.015	-0.533*	0.010	-0.516**	0.050	-0.456*
径流量Runoff	0.010	-0.513*	0.032	-0.480*	0.006	-0.543**	0.016	-0.546*

注：*表示在0.05水平上存在显著关系，**表示在0.01水平上存在显著关系。下同 Note: * and ** indicates significant differences for 0.05 and 0.01, respectively. The same below

泥沙中有机碳浓度变化范围（括号内为均值）分别为：5.47 ~ 8.72 g kg⁻¹ (7.69 g kg⁻¹)、7.26 ~ 9.89 g kg⁻¹ (8.58 g kg⁻¹)、6.59 ~ 9.32 g kg⁻¹ (8.08 g kg⁻¹)、7.64 ~ 10.64 g kg⁻¹ (8.93 g kg⁻¹)。表明，随着侵蚀裸地向草地、果园和林地的转变，不仅表层土壤中有机碳含量增加明显（表1），侵蚀泥沙带走的有机碳浓度也有所增加。

相关性分析表明，雨强和泥沙流失量对泥沙中有机碳含量存在明显影响，这在四种类型小区中均

得到体现（表4）。随着雨强的增大，四种小区流失泥沙中有机碳浓度也显著降低。此外，泥沙含碳量与泥沙流失量之间均呈负相关关系，但因为裸地和果园侵蚀强度大，泥沙碳含量与泥沙流失量存在显著相关（ $p < 0.05$ ），而草地和林地侵蚀模数很小，造成泥沙中有机碳浓度与泥沙流失量的负相关关系未达到显著水平（ $p > 0.05$ ）。低强度降雨对有机碳的选择性分解迁移更加明显，雨强增大降低了侵蚀过程中有机碳迁移的选择性。

表4 不同类型径流小区下雨强和泥沙量对侵蚀泥沙含碳量的影响（方差分析结果）

	裸地Bare land		草地Grassland		果园Orchard		林地Forest land	
	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
雨强Rainfall intensity	0.000	-0.878**	0.017	-0.760*	0.000	-0.722**	0.003	-0.674**
泥沙量Sediment yield	0.014	-0.495*	0.327	-0.370	0.016	-0.518*	0.277	-0.280

侵蚀过程中，有机碳在泥沙中会呈现富集现象。监测结果表明，裸地、草地、果园和林地泥沙有机碳富集比（均值 ± 标准差， n 为监测场数）分别为 1.27 ± 0.15 （ $n=24$ ）、 0.80 ± 0.09 （ $n=9$ ）、 1.10 ± 0.11 （ $n=21$ ）和 0.58 ± 0.05 （ $n=17$ ）。有机碳富集比排序为裸地 > 果园 > 草地 > 林地，这也就意味着随着土壤侵蚀强度的降低（即土地利用方式从裸地到草地、果园和林地的转换），泥沙有机碳富集比减小，二者变化方向是一致的。各处理间泥沙有机碳富集比的差异，是不同土地利用方式之间质量较轻、有机碳含量较高的土壤颗粒优先运移变化所致。方差分析进一步表明，坡面尺度的水蚀过程中，泥沙有机碳富集比均随着雨强的增大而减小（表5），并且除果园之外另外三种类型还呈显著负相关（ $p < 0.05$ ），降雨强度成为影响泥沙有机

碳富集比的重要因素。

监测期间，裸地、草地、果园和林地通过泥沙迁移而损失的有机碳占比平均值分别为：64.67%、47.38%、53.94%和36.03%。裸地和果园这两种侵蚀强度较大的小区，大雨强情况下，泥沙结合态碳损失占比也大，即随着雨强变大，有机碳就更有可能会随着泥沙迁移。而对草地和林地两种类型而言，有机碳随径流迁移还是随泥沙迁移的几率与雨强变化无明显关系。这表明当雨强不足以大量搬运土壤颗粒时，DOC的径流迁移可能是土壤有机碳损失的非常重要途径。

2.5 不同土地利用方式间有机碳损失的差异

监测结果表明，随着雨强的变化，四种类型径流小区之间碳损失模数（有机碳损失总量）存在差异（图4）。24场降雨下裸地均存在一定的有机碳

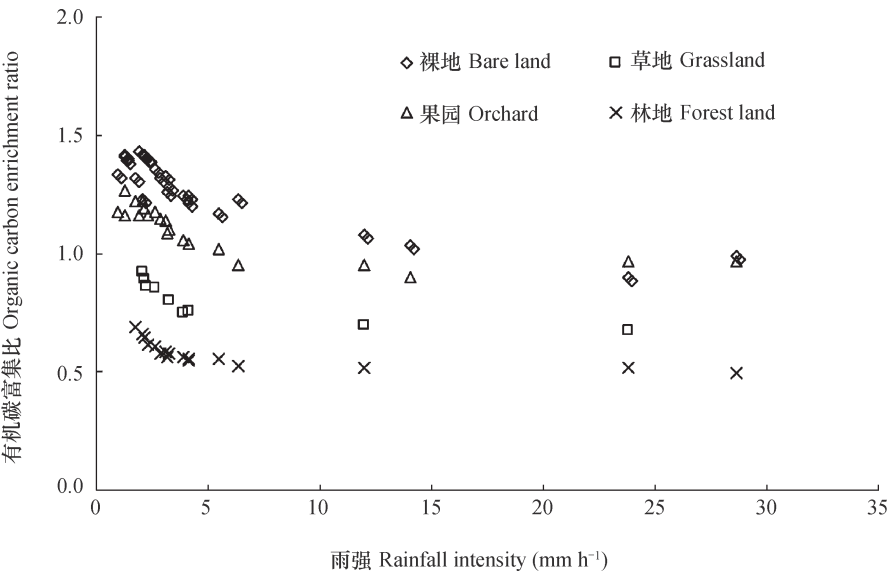


图3 不同类型径流小区各雨强下泥沙有机碳富集比

Fig. 3 Organic carbon enrichment ratio of sediment relative to rainfall intensity and plot

表5 不同类型径流小区下雨强对泥沙中有机碳富集比的影响（方差分析结果）

Table 5	Effect of rain intensity on organic carbon enrichment ratio of sediment relative to plot (Result of variance analysis)							
	裸地Bare land		草地Grassland		果园Orchard		林地Forest land	
	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
雨强Rainfall intensity	0.000	-0.878**	0.016	-0.766*	0.911	-0.024	0.004	-0.662**

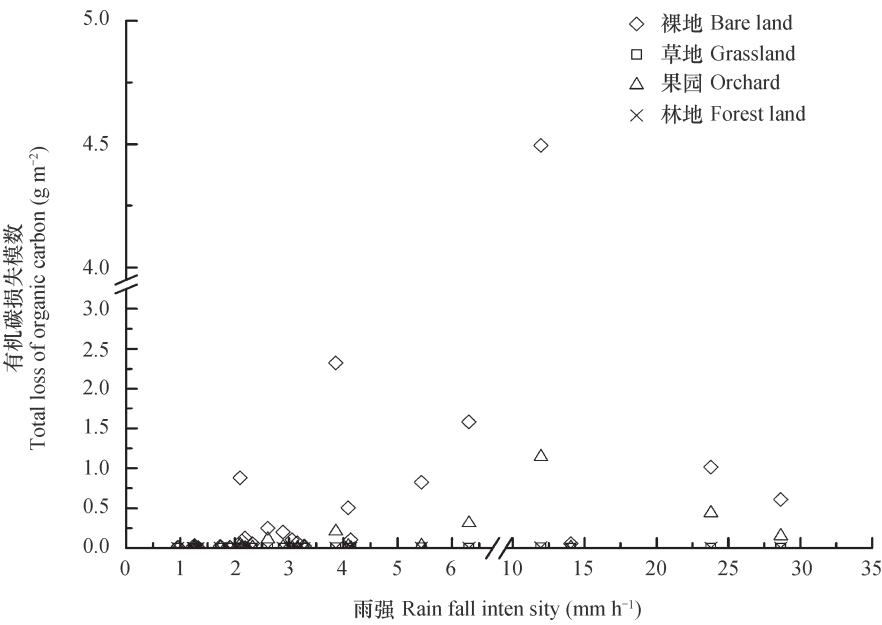
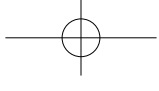


图4 不同类型径流小区有机碳损失总量的差异

Fig. 4 Differences between the plots in total loss of organic carbon



损失，而草地、果园和林地则分别有22场、21场和18场降雨下存在碳的流失。随雨强的增大，不同类型小区碳流失模数的差异也越来越大。裸地、草地、果园和林地碳流失模数分别为560.3、1.98、122.5和2.66 mg m⁻²。裸地有机碳流失强度明显高于其他三种类型小区，果园由于缺乏林下植被层保护也存在较强的碳损失，草地和林地碳损失强度均很弱，两者之间也不存在显著差异。总体而言，随降雨强度的增大，不同类型小区有机碳的流失总量也在增大，但是二者之间的这种正相关关系未达到显著水平。

3 讨 论

3.1 侵蚀背景下有机碳的选择性迁移

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^[17]。在降雨激发和侵蚀过程中，土壤中累积的溶解性有机碳产生吸附和解吸并随径流迁移损失^[18]，而矿物结合态有机碳（Mineral-bonded organic carbon, MOC）以及颗粒有机碳（Particulate organic carbon, POC）相对稳定但易以泥沙作为载体被地表水流优先搬运^[19]。

基于野外标准径流小区的自然降雨条件下的监测结果，红壤坡面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。本研究中裸地、草地、果园和林地四种利用类型通过泥沙损失的有机碳占比分别为64.67%、47.38%、53.94%和36.03%，平均为50.51%，这与袁东海等^[20]在第四纪红黏土发育红壤上的监测结果相一致。但聂小东等^[14]在红壤区坡耕地的模拟降雨试验却表明，泥沙结合态有机碳流失量占有机碳总流失量的84%以上，最高达97.6%，相关研究结果差别较大。同样在黄土高原的研究也存在差异。许明祥和刘国彬^[7]以及贾松伟等^[21]均指出土壤流失所携带的大量黏、粉粒是有机碳搬运的主要载体，最高可以达到95%以上；但马祥华和焦菊英^[8]却发现通过泥沙流失的有机碳含量与通过径流流失的有机碳含量相当，这种差异可能与不同的研究对象或研究方法等有关。

因此，坡地有机碳流失的主要途径既有以泥沙结合态为主的也有以径流溶解态为主的，这可能与土壤类型、有机碳含量、耕作措施、降雨时间及降

雨强度等特性相关。特别是降雨特性、土壤类型及其有机碳含量对泥沙和径流中的有机碳起着决定性作用。对于裸地等侵蚀程度较大的小区（相当于前人研究中模拟降雨下的坡耕地小区），有机碳的选择性迁移途径与降雨特性密切相关，随着雨强增大有机碳就更有可能随着泥沙迁移。

3.2 侵蚀泥沙有机碳富集比的变化及影响因素

侵蚀过程中泥沙有机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径流运移作用下优先迁移的结果，早在1952年就得到相关结论^[22]。本研究坡面尺度的水蚀过程中，泥沙有机碳富集比均随着雨强的增大而减小，降雨强度成为影响泥沙有机碳富集比的重要因素；不同土地利用类型间随着侵蚀强度的增大，泥沙有机碳富集比也增大。这与国内外众多研究结果是一致的^[13, 23-26]。如在红壤坡耕地的模拟降雨试验发现^[14]，在整个降雨过程中，小雨强（0.64 mm min⁻¹）泥沙有机碳富集比均大于1，大雨强（1.69 mm min⁻¹）均小于1，有机碳的选择性迁移在低强度降雨条件下表现更为明显。Jacinthe等^[9]也认为与高强度降雨相比，土壤碳在低强度降雨中泥沙富集比更高，显示出更高的选择性。

分析雨强对有机碳迁移影响的原因，主要是因为坡面地表径流产生后，小降雨时径流首先搬运土壤中的细小颗粒物质，形成泥沙中黏粒的富集^[13, 27]。雨强增大增加了径流的运移能力，大团聚体和大颗粒同样被迁移^[26]，导致泥沙流失量增加，但已有研究表明，土壤大颗粒物质中有机碳的含量远低于小粒级土壤^[28]，黏粒等小粒级土壤是有机碳流失的主要载体^[9, 29]。土壤有机碳在土壤黏粒中分布较多，在沙粒中分布较少，其含量随土壤颗粒粒径的加粗而逐渐下降^[30]。李光录和张胜利^[31]也表明侵蚀作用下土壤有机碳主要分布在粒径<50 μm的黏粒和粉粒中。因此，低强度降雨对有机碳的选择性分解迁移更加明显，雨强增大降低了侵蚀过程中有机碳迁移的选择性。

张雪等^[12]同样是在红壤坡耕地的模拟降雨试验却得到不同的结论，大雨强（1.64 mm min⁻¹）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，而小雨强条件下（0.58 mm min⁻¹）泥沙中有机碳则几乎无富集。此外，黄土丘陵区泥沙有机碳富集比始终大于1^[21]。造成侵蚀作用下土壤有机碳的泥沙富集比研究结果差别较大的原

因是多方面的,是土壤侵蚀与土壤碳循环的研究热点。这主要与土壤碳素在不同侵蚀条件下随水沙迁移的复杂性有密切关系,其中泥沙有机碳的富集规律就是这种复杂性的反映。综上,泥沙有机碳富集比受到坡长和降雨持续时间^[23]、季节和降雨强度^[10]、土地管理方式和植被条件^[11]以及土壤类型^[12]等的密切影响。

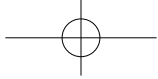
4 结 论

自然降雨下红壤区野外径流小区监测结果表明,裸地、草地、果园和林地四种类型坡面侵蚀作用下土壤有机碳随泥沙迁移的比例分别为64.67%、47.38%、53.94%和36.03%,碳平均损失强度分别为560.3、1.98、122.5和2.66 mg m⁻²。随着雨强的增大,不同类型小区之间碳流失强度的差异和损失总量也越来越大。土地利用类型和降雨特性对有机碳在径流和泥沙间的选择性迁移均会产生影响。不同土地利用类型之间随着侵蚀程度的加重,有机碳更易随着泥沙迁移,泥沙有机碳富集比也增大,而泥沙有机碳富集比随着雨强的增大而减小。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Global soil erosion by water and carbon dynamics//Lal R, Kimble J M, Levine E, et al. Soils and global change. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995: 131—142
- [2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. Environment International, 2003, 29 (4) : 437—450
- [3] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review. Geoderma, 2005, 124 (1) : 3—22
- [4] 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
- [5] Shi Z, Yue B, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (1) : 257—267
- [6] Ma W, Li Z, Ding K, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation. Geomorphology, 2014, 226: 217—225
- [7] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (1) : 40—46
- [8] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系. 中国水土保持科学, 2005, 3 (2) : 15—22
- [9] Ma X H, Jiao J Y. Characteristics of vegetation with natural restoration in removal lands in loess hilly-gully region and the relationship between the characteristics and soil environment (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3 (2) : 15—22
- [10] Jacinthe P A, Lal R, Owens L, 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] Wang Z G, Govers G, Steegen A, et al. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area. Geomorphology, 2010, 124 (1/2) : 65—74
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 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. 土壤学报, 2013, 50 (5) : 900—908
- [17] Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil organic carbon enrichment in sediment (In Chinese). Acta Pedologica Science, 2013, 50 (5) : 900—908
- [18] 章明奎, 刘兆云. 红壤坡耕地侵蚀过程中土壤有机碳的选择性迁移. 水土保持学报, 2009, 23 (1) : 45—49
- [19] Zhang M K, Liu Z Y. Soil Erosion-induced selective transfer of various forms of organic carbon in red soil slope field (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 (1) : 45—49

- [16] 杨洁, 郭晓敏, 宋月君, 等. 江西红壤坡地柑橘园生态水文特征及水土保持效益. 应用生态学报, 2012, 23 (2) : 468—474
Yang J, Guo X M, Song Y J, et al. Eco-hydrological characteristics and soil and water conservation effect of citrus plantation on slope red soil of Jiangxi Province, China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (2) : 468—474
- [17] 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) : 2847—2854
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) : 2847—2854
- [18] Gao Y, Zhu B, He N P, et al. Phosphorus and carbon competitive sorption-desorption and associated non-point loss respond to natural rainfall events. Journal of Hydrology, 2014, 517: 447—457
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] Jackson M, Massey H. Selective erosion of soil fertility constituents. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16 (4) : 353—356
- [23] Polyakov V O, Lal R. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. Soil Science, 2004, 169 (8) : 590—599
- [24] Rumpel C, Chaplot V, Planchon O, et al. Preferential erosion of black carbon on steep slopes with slashes and burn agriculture. Catena, 2006, 65 (1) : 30—40
- [25] 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) : 2516—2522
Guo W, Shi Z H, Chen L D, et al. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hill slope in red soils (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (6) : 2516—2522
- [26] Schiettecatte W, Gabrils D, Cornelis W, et al. Enrichment of organic carbon in sediment transport by inter rill and rill erosion processes. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72 (1) : 50—55
- [27] 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 bed loads (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (4) : 541—544
- [28] Christensen B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates. Advances in Soil Sciences, 1992, 20: 1—90
- [29] Ramos M C, 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
- [30] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中C、N、P、K的分配及N的有效性研究. 土壤学报, 2000, 37 (1) : 85—94
Wang Y, Yang Z M, Shen Q R. Distribution of C, N, P and K in different particle size fractions of soil and availability of in each fraction (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37 (1) : 85—94
- [31] 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. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35 (8) : 146—150
Li G L, Zhang S L. Effect of soil erosion on distribution of C and N in different particle size fractions of soil on the southern Loess Plateau (In Chinese). Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35 (8) : 146—150



Soil Erosion-induced Selective Transfer of Organic Carbon in Red Soil Slope Field under Natural Rainfall

XIAO Shengsheng^{1, 2} TANG Chongjun^{1, 2} WANG Lingyun¹ DUAN Jian^{1, 2} YANG Jie^{1, 2†}

(¹ Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China)

(² Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention of Jiangxi Province, Nanchang 330029, China)

Abstract 【Objective】The red soil hilly region in South China is one of the areas of the country suffering serious soil erosion. Currently, the researches on loss of soil organic carbon with soil erosion in this region were executed mainly via simulated rainfall tests, without much in-situ field quantitative monitoring under natural rainfalls or comparison between fields different in land use. This study was intended to explore relationships of surface runoff and sediment loss with organic carbon carried in runoff and sediment under natural rainfall, so as to characterize responses of soil organic carbon transfer and loss to changes in rainfall, soil erosion and land use, and to deepen the scientific knowledge about relationship between soil erosion and carbon recycling. 【Method】Tracts of bare land, grassland, citrus orchard, and secondary splash pine forest were selected for the experiment as runoff plots in the Jiangxi Soil and Water Conservation Ecological Science Park. Surface runoff, sediment loss and soil organic carbon carried therein were monitored under 24 typical rainfalls between March to August, 2015 in order to illustrate selective transfer of soil organic carbon. 【Result】Results show as follow: (1) Runoff coefficients and the soil erosion modulus increased with increasing rainfall intensity during all the 24 rainfall events. With the conversion of land use in type from bare land to orchard, grassland and forest, the effects of land use reducing runoff and sediment increased. Rainfall intensity was the major factor affecting runoff volume, while the latter was the one affecting sediment loss, with correlation coefficient being $0.89 \sim 0.92$ ($p < 0.001$) and $0.95 \sim 0.98$ ($p < 0.05$), respectively. (2) Under natural rainfalls, the concentration of organic carbon was 5.00, 7.68, 6.11 and 10.02 mg L⁻¹ in runoff and 7.69, 8.58, 8.08 and 8.93 g kg⁻¹ in sediment on the bare land, grassland, orchard and forest, respectively. The concentration of organic carbon in runoff was significantly and negatively related to volume of the runoff and so was the concentration in sediment with the volume of sediment loss. The sediment-associated loss of soil organic carbon in the four plots accounted for 64.67%, 47.38%, 53.94% and 36.03% of the total lost with the erosion, and reached 560.3 mg m⁻², 1.98 mg m⁻², 122.5 mg m⁻² and 2.66 mg m⁻² in intensity, respectively. (3) The organic carbon enrichment ratio of the sediment in the bare land, orchard, grassland and forest was 1.27, 1.10, 0.80 and 0.58, respectively, and decreased gradually with increasing rainfall intensity. Selective transfer of organic carbon was more evident in weak rainfalls. 【Conclusion】Under natural rainfalls, soil erosion has very important impacts on migration of soil organic carbon in slope fields in the red soil region. Selective migration of soil organic carbon with surface runoff or sediment is determined mainly by rainfall characteristics (especially rainfall intensity) and land use pattern. In all the lands, regardless of land use, intensified soil erosion makes it easier for soil organic carbon to migrate with sediment, and organic carbon enrichment ratio of the sediments also increases with intensifying soil erosion. However, organic carbon enrichment ratio of the sediment decreases with rising rainfall intensity.

Key words Natural rainfall; Water erosion; Soil organic carbon; Red soil slope; Enrichment ratio

(责任编辑: 陈荣府)

<http://pedologica.issas.ac.cn>