

坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析

任瑞雪¹, 张风宝^{1,2}, 杨明义^{1,2}, 王永吉¹, 王子豪¹, 邓鑫欣¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以野外布设的径流小区为研究对象, 采用模拟降雨方法研究随机条件下降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量及流失过程的动态变化规律。结果表明: (1) 降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量随降雨的进行逐渐降低并趋于平稳, 与坡面土壤有机碳含量相比显著增高 ($p < 0.01$), 有机碳在泥沙中明显富集, 富集比最大值达 1.780, 泥沙中有机碳含量及富集比随侵蚀速率的增加明显减小且趋于稳定; (2) 泥沙有机碳流失速率随降雨的进行先波动增大, 达到最大值后又波动减小, 最后逐渐趋于准稳定, 整个过程呈单峰分布; (3) 泥沙有机碳流失强度与土壤侵蚀强度呈显著性线性正相关 ($p < 0.01$), 说明土壤侵蚀量决定侵蚀过程中有机碳流失量, 准确获取土壤侵蚀强度是估算坡面有机碳流失量的基础。

关键词: 坡面侵蚀; 模拟降雨; 土壤有机碳流失

中图分类号: S153.6⁺21; S157 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2017)06-0015-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.003

Characteristics of Sediment Organic Carbon Loss During Slope Erosion Process

REN Ruixue¹, ZHANG Fengbao^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2},

WANG Yongji¹, WANG Zihao¹, DENG Xinxin¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In this study, simulated rainfall was conducted to mainly investigate and analyze organic carbon content of sediment and its dynamic change during the rainfall on the outdoor runoff plot under random conditions. The sediment organic carbon content, which was significantly higher than that of the soil organic carbon ($p < 0.01$), decreased gradually during the early stage of the rainfall, then tended to be stable in the later stage. The organic carbon was obviously enriched in sediment, and the maximum of enrichment ratio was 1.780. The content and enrichment ratio of organic carbon in sediment decreased obviously with the increasing of erosion rate, and tended to be stable. The loss process of sediment organic carbon showed a unimodal distribution during the rainfall, which increased first with the rainfall, then decreased after reaching the maximum value, and finally tended to quasi stable. There was a significant linear relationship between soil organic carbon loss and soil erosion amount ($p < 0.01$), indicating that soil erosion amount determined the organic carbon loss during the erosion process, so accurate estimation of soil erosion intensity was the basis of estimating organic carbon loss on the slope.

Keywords: slope erosion; simulated rainfall; soil organic carbon loss

土壤侵蚀是当前最为严重的环境问题之一, 不仅制约着农业的可持续发展, 而且对人类赖以生存的生态环境造成极大的威胁, 并对全球气候变化以及碳循环产生重要影响^[1]。据估算, 流失的土壤有机碳约 50%~70% 是由土壤侵蚀造成^[1], 伴随着土壤有机碳的流失, 土壤结构遭到破坏, 土壤肥力下降, 土地生产力降低; 另一方面, 土壤侵蚀对有机碳的选择性侵蚀,

可能直接影响有机碳的分解、转化乃至二氧化碳的释放, 进而影响到全球气候变化。因此, 土壤侵蚀对土壤碳流失的影响已经成为目前全球碳循环研究的重要方面, 深究土壤侵蚀条件下的碳循环问题显得尤为重要。目前, 国内关于土壤侵蚀对土壤有机碳的影响研究主要集中在黄土高原、东北黑土区以及南方红壤丘陵区。聂小东等^[2]对泥沙和径流中的有机碳的分

收稿日期: 2017-05-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402406); 国家自然科学基金项目(41571130082, 41371283, 41671281)

第一作者: 任瑞雪(1992—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: rxRen93@163.com

通信作者: 张风宝(1980—), 男, 宁夏彭阳人, 博士, 副研究员, 主要从事坡面土壤侵蚀过程及机制研究。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

布特征进行研究,认为在侵蚀条件下,土壤有机碳是随径流和泥沙的迁移而流失,其中泥沙迁移是土壤有机碳的主要流失方式;方华军等^[3]对东北黑土区土壤有机碳和团聚体结合碳的空间分布进行研究,认为土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大的团聚体,轻质的活性碳和细颗粒结合的情性碳随地表水流迁移;贾松伟^[4]研究了黄土丘陵区不同坡度对土壤有机碳流失量的影响,结果表明土壤有机碳流失程度与坡度呈明显的指数关系。另外,李忠武等^[5]、陆银梅等^[6]、张雪等^[7]、Hemelryck 等^[8]、Oost 等^[9]、Wang 等^[10]就侵蚀条件下土壤及泥沙中有机碳的组分、空间分布、流失方式、影响因子等方面进行研究,取得了一些成果,但整体而言,目前对降雨侵蚀过程中泥沙有机碳流失变化规律的试验研究还相对较少,数据积累量有限,深度和广度还有待进一步的加深。

本文以黄土高原典型土壤的野外径流小区为对象,主要研究随机条件下降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量及有机碳流失动态变化规律,其目的是从侵蚀过程中了解土壤侵蚀造成土地肥力及生产力降低的机理问题,以便为坡面土壤有机碳流失评价、预测以及防止坡面土壤有机碳流失提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外观测试验布设在陕西杨凌区国家节水博览园内。杨凌区位于渭河流域关中平原西安—宝鸡之间(107°59′—108°08′E, 34°14′—34°20′N),总面积 94.18 km²。该区属于暖温带半湿润半干旱气候区,

具有春暖多风、夏季多雨、秋热多连阴雨、冬寒干燥等明显的大陆性季风气候特征。年平均气温 12.9 ℃,无霜期 211 d,初霜期在 10 月份下旬,年降水量 327.1~979.7 mm,年平均降水量 635.1 mm,年平均蒸发量 993.2 mm。该区由南向北有渭河滩地、一级阶地、二级阶地、三级阶地等地貌。地势西北高、东西低,地面坡降 7‰左右,海拔 418.0~540.1 m,由北向南分布有黄土台塬、渭河阶地、漫滩。土壤类型以第四纪黄土为主,土壤有机质含量中部高,南北低,平均含量 1.85%(以地块为单位),土壤容重约为 1.2 g/cm³。

1.2 模拟降雨试验

试验选取了 6 个规格相同(长 5 m,宽 2 m)的径流小区,坡度分别为 5°,10°,15°,20°,25°,30°,小区采用砖砌,用 PVC 板将小区分为宽 0.5 m 的背景采样区和 1.5 m 宽的降雨模拟试验区(图 1)。径流小区全部用杨凌耕地(16%黏粒、57%粉粒、27%砂粒)的表层土壤进行填充,填充厚度超过 40 cm。采用分层装填,填装过程中土壤容重大致控制在 1.2 g/cm³,填装完成后,进行多次翻耕,模拟耕地的人为扰动过程,使其耕层土壤混合均匀,耕层土壤经过重塑与自然沉降过程,其容重、孔隙度、导水率等性质和正真的坡耕地相近,将小区放置 5 个月以上。放置过程中使用除草剂对小区进行处理,使其保持裸露,放置期间如果有侵蚀性降雨,用塑料布将其遮盖,以免发生侵蚀,放置和避免坡面被侵蚀主要是为了和⁷Be 示踪坡面土壤侵蚀的试验相结合,⁷Be 示踪的相关成果已经发表^[11-12]。在小区边界注入沥青,以消除边界效应。

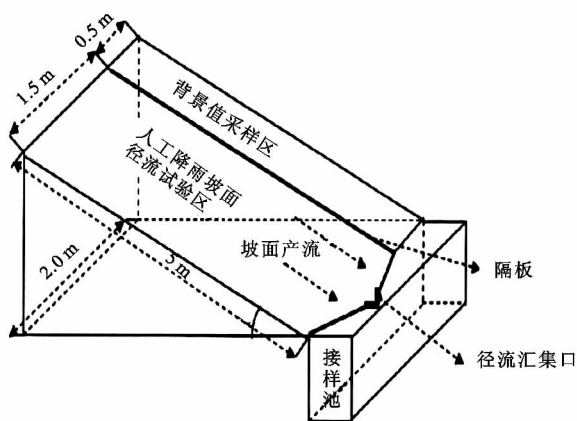
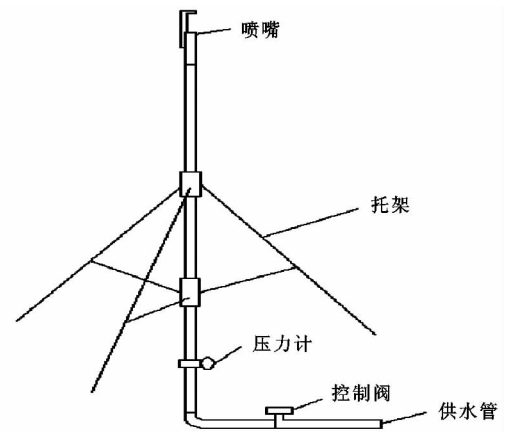


图 1 试验小区及降雨器示意



降雨模拟试验采用 3 个侧喷式降雨模拟器,分别设置在小区的左侧、右侧和顶部。装置支架高 4 m,喷头直径为 9 mm,设计雨强 90 mm/h,但因各方面的因素影响,导致各小区实际雨强与设计雨强有一定的差异,实测雨强见表 1。试验前,用塑料布覆盖小区进行降雨强度与均匀度的率定,坡面降雨量变异系数小于 20%。降雨器见图 1,模拟降雨试验及各径流小区降雨时基本情况见表 1。

表 1 模拟降雨试验与径流小区基本情况

小区 坡度/(°)	降雨日期 (年-月-日)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)
5	2007-08-02	99	1.09	6.77	3.359
10	2007-09-14	101	1.06	14.64	3.298
15	2007-07-23	121	1.09	13.81	3.184
20	2007-10-19	103	1.11	17.48	3.621
25	2007-08-26	92	1.07	3.78	2.991
30	2008-06-12	86	0.97	10.90	3.059

1.3 样品采集

土样的采集:为减少对降雨模拟试验区的干扰,在0.5 m宽的背景采样区进行土样的采集。将背景区均分为3个采样带,坡顶到坡底依次为A、B、C样带,每个样带设定一个采样点,采样深度为5 cm,3个采样点的样品混合为一个样代表背景样品。

泥沙样收集:模拟降雨过程中,坡面产流后,在接样口用塑料桶接收径流泥沙,每桶接满后记录时间,同时收集下一个径流泥沙样,并对样品进行编号,依次进行直至降雨结束。

1.4 样品处理与测定

土壤样品:将采集的坡面土壤样品进行室内阴干,去除杂物,研磨后过0.15 mm筛,装瓶备用。将处理后的风干土样采用重铬酸钾外加热法进行测定,得到坡面土壤有机碳的背景值。

泥沙样:将人工模拟降雨试验中采集的径流泥沙样品用虹吸沉降法进行水沙分离,然后风干,处理方法与土壤样相同,将得到的泥沙样进行处理后采用重铬酸钾外加热法测定。

1.5 数据统计与分析

利用Excel、SPSS 21.0软件对数据进行统计与分析,Excel、CAD软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量的变化特征

表2为各小区泥沙有机碳含量及富集比的基本统计参数。从表2可以看出,25°和30°小区较其他小区泥沙有机碳含量变化范围较小,分别为3.056~3.567 g/kg和3.044~3.444 g/kg,20°小区变化范围最大为3.690~6.104 g/kg,极差为2.414 g/kg;从泥沙中有机碳含量的变异性来看,25°和30°小区的变异系数均小于其他小区,变异系数分别为3.3%和3.7%,而其他小区变异系数均大于10%,其中20°小区变异系数最大,达到14.5%,5°和20°小区泥沙有机碳平均含量及标准差均大于其他小区。富集比是指侵蚀泥沙中某种土壤养分含量与土壤

中该养分含量的比值,是土壤中有机碳选择性迁移的一种表现形式^[13]。唐克丽等^[14]通过对河流泥沙中养分与坡耕地土壤养分对比分析表明泥沙中有机质有明显的富集现象。由表2可知,5°,10°,15°,20°,25°,30°小区泥沙有机碳富集比变化范围分别为1.203~1.780,0.979~1.536,0.998~1.490,1.019~1.686,1.022~1.193,1.0~1.130,所有小区富集比的最大值为1.780,最小值为0.979,各小区平均富集比均大于1,说明在侵蚀过程中泥沙有机碳产生了明显的富集现象,其中有两组富集比数据略小于1,可能与测量误差有关。从各小区泥沙有机碳含量及富集比的变异系数上来看,两者几乎完全相同。

图2a为降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量的变化图。从图2a可以看出,除25°和30°小区泥沙有机碳含量变化趋势不太明显之外,其他各小区在整个降雨过程中泥沙有机碳含量随降雨进行呈现出一定的规律。降雨前期,泥沙有机碳含量较高(5~6.5 g/kg),且大于降雨中后期泥沙有机碳的含量,随着降雨的进行,泥沙有机碳的含量在波动中逐渐降低,最后趋于稳定(3~4 g/kg),接近土壤中有机碳的含量。对各小区泥沙有机碳的含量与土壤有机碳含量进行单样本 t 检验分析,结果表明两者呈极显著性差异($p < 0.01$)(表3)。虽然各小区的雨强、坡度、近地表条件及产流时间有所差异,泥沙有机碳含量的波动及趋于稳定的范围不同,但从整体趋势来看,泥沙有机碳含量随降雨历时的变化趋势具有内在的一致性。图2b是降雨侵蚀过程中泥沙有机碳富集比的变化趋势,从图2b可以看出,除25°小区和30°小区富集比变化趋势不太明显之外,其他小区富集比比较接近,在降雨前期,泥沙有机碳的富集比较大,且大于降雨中后期泥沙有机碳富集比,随着降雨的进行,富集比逐渐降低,最后趋于稳定。从整体趋势上来看,泥沙有机碳富集比随降雨进行的变化趋势与有机碳含量的变化趋势一致。

表2 各小区泥沙有机碳含量及富集比的基本统计量

小区 坡度/(°)	样本数	泥沙有机碳含量/(g·kg ⁻¹)					富集比				
		最大值	最小值	均值	标准差	变异系数/%	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数/%
5	10	5.977	4.041	4.908	0.690	14.1	1.780	1.203	1.461	0.205	14.0
10	20	5.066	3.230	3.657	0.398	10.9	1.536	0.979	1.109	0.121	10.9
15	19	5.100	3.416	3.865	0.390	10.1	1.490	0.998	1.129	0.114	10.1
20	14	6.104	3.690	4.269	0.620	14.5	1.686	1.019	1.179	0.171	14.5
25	21	3.567	3.056	3.295	0.110	3.3	1.193	1.022	1.102	0.037	3.4
30	22	3.444	3.044	3.148	0.116	3.7	1.130	1.000	1.053	0.039	3.7

图3为降雨过程中泥沙有机碳含量与侵蚀速率的变化关系图。从图3可知,降雨过程中随侵蚀速率的增大,泥沙中有机碳含量逐渐减少,最后趋于稳定,且接近土壤中有机碳含量,这说明侵蚀强度对泥沙中有机碳含量及富集比有重要影响,这种影响

可能是由坡面径流及坡面侵蚀方式随降雨的转变所致。侵蚀初始阶段,径流速率较小,径流优先搬运轻质细小富含有机碳的颗粒,土壤侵蚀方式以片蚀为主,具有明显的分选性,所以泥沙中有机碳含量较高,随降雨的进行,坡面降水入渗减少,径流量增大,

坡面开始出现细沟侵蚀,且细沟侵蚀量比例逐渐增高,相关研究表明细沟侵蚀不具有分选性^[15-17],尽

管侵蚀强度增大,泥沙中有机碳含量反而变小,富集比也随之减小^[18-19]。

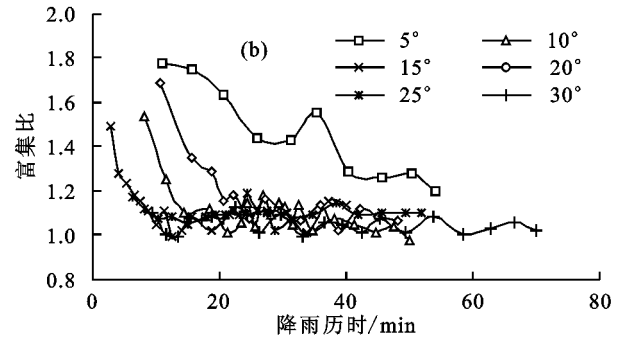
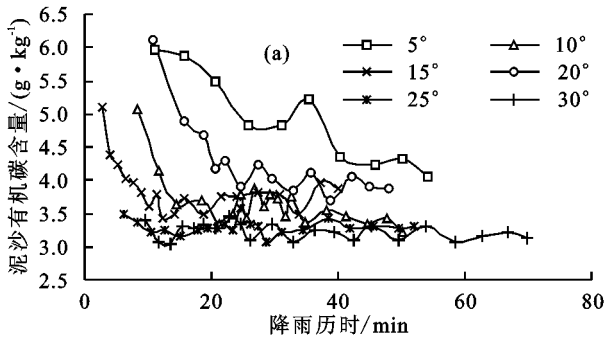


图 2 各小区泥沙有机碳含量及富集比随降雨历时的变化

表 3 各小区泥沙有机碳含量的 t 检验分析

小区/(°)	t 值	自由度	检验值	样本均值	概率 P
5	7.101	9	3.359	4.908	0.000
10	4.029	19	3.298	3.657	0.001
15	7.598	18	3.184	3.865	0.000
20	1.691	13	3.621	4.269	0.002
25	12.730	20	2.991	3.295	0.000
30	3.578	21	3.059	3.148	0.002

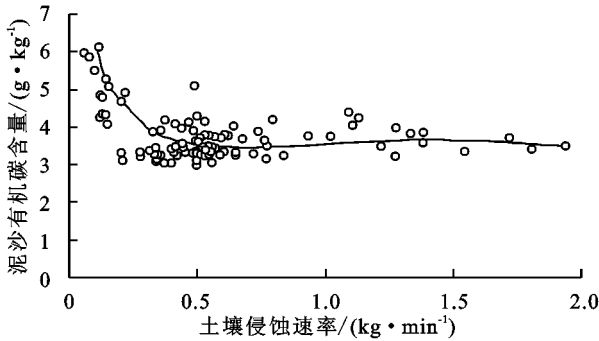


图 3 降雨过程中泥沙有机碳含量与侵蚀速率的关系

2.2 侵蚀过程中泥沙有机碳流失速率的变化特征

图 4a 为坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失速率的变化趋势。对各小区而言,5°小区在整个降雨侵蚀过

程中泥沙有机碳流失速率变化不明显;10°,20°和 30°小区泥沙有机碳流失速率整体变化幅度相对较小,有机碳流失速率达到最大值后下降趋势较小;15°和 25°小区在降雨前期泥沙有机碳流失速率较大,并且明显大于降雨中后期泥沙有机碳流失速率,随后迅速下降。对所有的泥沙样而言(除 5°小区之外),尽管在流失速率大小上有一定区别,但泥沙有机碳流失速率随降雨历时的增大先增大,达到最大值后迅速下降,最后逐渐趋于稳定,呈明显的单峰分布,与坡面土壤侵蚀速率的变化比较相似。降雨过程中坡面有机碳流失的这种变化主要因降雨过程侵蚀速率的变化所致,随降雨的进行,侵蚀方式由片蚀为主转为以面蚀为主,侵蚀速率增加,到降雨中后期,径流量基本稳定,细沟发展也基本停止,细沟沟底坡度与坡面基本一致,侵蚀速率呈减小趋势(图 4b),相应有机碳流失量也减少。对于 5°小区而言,主要是坡度小,只发生了片蚀,没有发生细沟侵蚀,侵蚀速率和其变异性都很小,导致有机碳流失速率变化不明显。

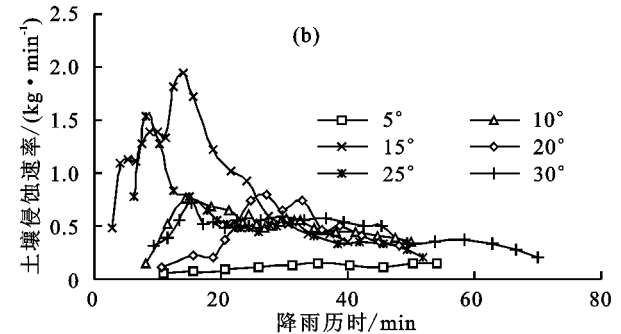
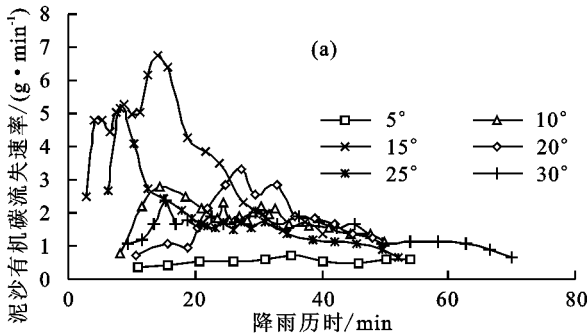


图 4 泥沙有机碳流失速率和土壤侵蚀速率随降雨历时的变化

2.3 坡面有机碳流失强度分析

图 5 为不同试验条件下泥沙有机碳流失强度与土壤侵蚀强度之间的关系。从图 5 可以看出,两者呈极显著的线性正相关关系($p < 0.01$),决定系数达到 0.97 以上,充分说明侵蚀强度越大,有机碳的流失强度越大。土壤侵蚀强度决定侵蚀过程中有机碳流失强度,因此在预测坡面有机碳流失量时,准确获取土

壤侵蚀强度是基础。

假定各小区在侵蚀过程中泥沙中有机碳含量与土壤有机碳含量相等,即不存在富集现象,基于该假设计算出各小区在降雨过程中的有机碳流失强度,并与实测的流失强度进行比较。从图 6 可以看出,二者呈显著正相关,从系数可以看出,实测有机碳流失量是基于土壤中有机碳含量估算的有机碳流失量的

1.14 倍左右,即泥沙中有机碳平均富集比在 1.14 左右,说明在泥沙中有机碳含量没有实测值的情况下,以土壤有机碳含量为基础进行计算,能够相对较准确的估算坡面有机碳的流失强度。降雨侵蚀过程中泥沙有机碳富集对坡面有机碳流失强度影响不大,主要由侵蚀强度决定。

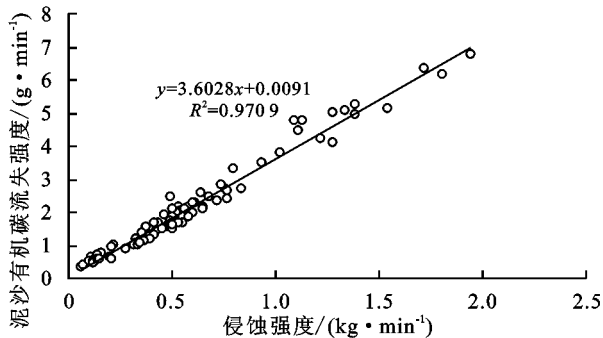


图5 泥沙有机碳流失强度与土壤侵蚀强度的关系

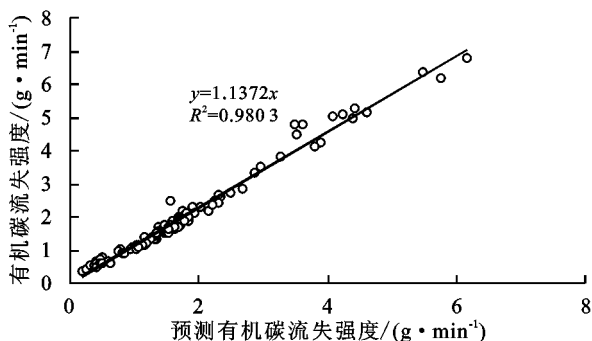


图6 实测有机碳流失强度与预测有机碳流失强度的关系

3 结论

本文通过研究随机条件下降雨侵蚀过程中泥沙有机碳含量及流失过程的动态变化,得出主要结论为:

(1)降雨侵蚀过程中,泥沙有机碳含量随降雨的进行逐渐降低并趋于平稳,与坡面土壤有机碳含量相比显著增高($p < 0.01$),有机碳在泥沙中有明显富集,富集比最大值为 1.780,泥沙中有机碳含量及富集比随侵蚀速率的增加明显减小且趋于稳定。

(2)坡面侵蚀过程各小区泥沙有机碳流失速率的动态变化规律为泥沙有机碳流失速率随降雨的进行先增大,达到最大值后迅速下降,最后逐渐趋于准稳定,整个过程呈单峰分布,与小区土壤侵蚀速率的变化趋势相似。

(3)土壤有机碳流失强度与土壤侵蚀强度呈显著线性关系($p < 0.01$),坡面流失的泥沙中有机碳富集对估算有机碳流失强度的影响相对较小,主要由侵蚀强度决定。

参考文献:

[1] Jong E D E, Kachanoski R G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1988, 68(1): 111-119.

- [2] 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[J].土壤学报,2013,50(5):900-908.
- [3] 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[J].生态学报,2006,26(9):2847-2854.
- [4] 贾松伟.黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J].水土保持研究,2009,16(2):30-33.
- [5] 李忠武,陆银梅,聂小东,等.基于坡面径流输沙模型的湘中红壤丘陵区土壤有机碳流失模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(12):115-124.
- [6] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失的影响[J].农业工程学报,2015,31(19):135-141.
- [7] 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[J].土壤学报,2012,49(3):465-473.
- [8] Hemelryck H V, Fiener P, Oost K V, et al. The effect of soil redistribution on soil organic carbon: An experimental study[J]. Biogeosciences, 2010, 7(12): 3971-3986.
- [9] Oost K V, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. Science, 2007, 318(5850): 626-629.
- [10] Wang Z, Govers G, Oost K V, et al. Soil organic carbon mobilization by interrill erosion: Insights from size fractions[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(2): 348-360.
- [11] Zhang F B, Yang M Y, Walling D E, et al. Using ^7Be measurements to estimate the relative contributions of interrill and rill erosion[J]. Geomorphology, 2014, 206: 392-402.
- [12] 张凤宝,杨明义,王光谦. ^7Be 示踪法估算土壤侵蚀速率模型计算结果比较[J].水土保持学报,2010,24(2):52-56,78.
- [13] Massey H F, Jackson M L. Selective erosion of soil fertility constituents[J]. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16(4): 353-356.
- [14] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J].环境科学,1984,5(6):52-57.
- [15] 和继军,吕焱,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
- [16] 周柱栋.北方土石山区草本植被对侵蚀过程粒径分选的影响[D].北京:北京林业大学,2016.
- [17] Merz W, Bryan R B. Critical conditions for rill initiation on sandy loam Brunisols: Laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada[J]. Geoderma, 1993, 57(4): 357-385.
- [18] 李光录,姚军,庞小明.黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程[J].土壤学报,2008,45(4):740-744.
- [19] 李忠武,王曙光,陈晓琳,等.侵蚀背景下湘中红壤丘陵区土地利用方式对土壤活性有机碳分布特征的影响研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(3):88-93.