

DOI: 10.11766/trxb201812150531

费凯, 张丽萍, 邓龙洲, 孙天宇, 范晓娟. 极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 623–635.
FEI Kai, ZHANG Liping, DENG Longzhou, SUN Tianyu, FAN Xiaojuan. Carbon Loss with Slope Surface Runoff and Interflow on Bare Slopes as Affected by Severe Rainstorm[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (3): 623–635.

极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征*

费 凯, 张丽萍[†], 邓龙洲, 孙天宇, 范晓娟

(浙江大学水土资源与环境研究所, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘 要: 采用人工模拟降雨的方法, 研究了不同雨强 (90、120、150 mm·h⁻¹) 和坡度 (5°、8°、15°、25°) 条件下, 南方风化花岗岩母质土壤红土层裸地降雨坡面径流和壤中流中总碳 (Total carbon, TC) 的流失量及流失过程, 并分析了雨强和坡度对 TC 流失量的影响。结果表明, 在坡面径流中, 坡度和雨强的增大对碳素质量浓度变化过程影响较小, 且流失率曲线与质量浓度曲线呈极显著相关关系, TC 流失率变化主要受质量浓度的影响; 在壤中流中, TC 质量浓度曲线呈现出迅速上升达到最大值后缓慢下降直至平稳的趋势; 在试验条件范围内, 各坡度条件下, 随着雨强的增大, 坡面径流中 TC 流失量增大, 而壤中流中 TC 流失量减小; 在大雨强下, 坡面径流中 TC 流失量与坡度没有明显的线性关系, 而随着雨强的增大, 坡度与壤中流中 TC 流失量线性关系明显增加; 在试验雨强和坡度下, 雨强对 TC 流失总量和坡面径流中 TC 流失量的影响较坡度更显著, 而在壤中流中坡度的影响则更显著。径流中碳素流失量与雨强、坡度及场降雨径流总量之间均有明显的线性关系, $R^2 > 0.800$ 。结果可为我国南方风化花岗岩母质土壤裸坡径流中 TC 单位面积流失量的估算提供依据。

关键词: 浙闽丘陵; 风化花岗岩母质土壤; 红土层; 土壤总碳流失浓度; 模拟降雨

中图分类号: X131.2 **文献标志码:** A

Carbon Loss with Slope Surface Runoff and Interflow on Bare Slopes as Affected by Severe Rainstorm

FEI Kai, ZHANG Liping[†], DENG Longzhou, SUN Tianyu, FAN Xiaojuan

(Institute of Soil Resources and Environment, Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: [Objective] According to the International Plant Protection Convention (IPPC), it is estimated that soil carbon loss contributes to the global atmospheric CO₂ concentration by about 30%–50%, and about 50%–70% of the loss is caused by soil erosion. Therefore, the loss of soil carbon through soil erosion has an important impact on carbon recycling and exchanging between terrestrial ecosystems and the atmosphere, and it plays a significant role in balancing the global CO₂ concentration and climate warming. Most studies on nutrient loss in China focus mainly on that in the loess plateau region and the purple soil region and pay attention mainly to nitrogen and phosphorous loss or TC loss with slope surface runoff, but almost neglect effects of the

* 国家自然科学基金项目 (41877065) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41877065)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

作者简介: 费 凯 (1994—), 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水资源利用与保护研究。E-mail: kafee940917@gmail.com

收稿日期: 2018–12–15; 收到修改稿日期: 2019–04–18; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019–05–28

two factors, slope gradient and rainfall intensity, on TC loss with interflow in soil, let alone dynamic process of TC loss distribution in slope surface runoff and interflow. Therefore, this study was done to explore characteristics of soil total carbon (TC) loss with slope surface runoff and interflow on bare slopes of the soil derived from weathered granite in the Zhejiang-Fujian hilly region, China. 【 Method 】 In this study an artificial rainfall simulation experiment was carried out to explore TC loss with slope surface runoff and interflow and its processes as affected by slope gradient and rainfall intensity and to analyze effects of the two on TC loss. So it was designed to have 3 levels of rainfall intensity (60, 90 and 150 mm·h⁻¹) and four levels of slope gradient (5°, 8°, 15° and 25°), performed on two three-dimensional monitoring simulator runoff flumes, arranged in parallel. TC loss from each flume was monitored and calculated. 【 Result 】 Results show that variation of the TC loss process with slope surface runoff was not much affected by slope gradient or rainfall intensity, and the TC loss rate variation curve was extra-significantly correlated with the mass concentration curve. That is to say, TC loss rate was affected mainly by TC mass concentration. In soil interflow, TC mass concentration curve peaked up rapidly and then declined and leveled off. In the experiment, TC loss with runoff increased with rising rainfall intensity, regardless of slope gradient, while TC loss with interflow decreased. No apparent linear relationship was found between TC loss with runoff and slope gradient under high rainfall intensities, while a linear relationship was looming between slope gradient and TC loss in the interflow. The influence of rainfall intensity on total TC loss and TC loss with runoff was more significant than that of slope gradient, but a reverse trend was observed in interflow. TC loss with runoff was found to be significantly and linearly related to rainfall intensity, slope gradient and runoff volume per rainfall event, with R^2 being higher than 0.800. 【 Conclusion 】 In summary, TC loss increases gradually with rising slope gradient and rainfall intensity. Slope surface runoff is the main factor affecting TC loss, but interflow is one that can not be ignored. This study provides a calculation method for estimating TC losses with surface runoff on bare slopes of the soil derived from weathered granite in the Zhejiang-Fujian hilly region, China.

Key words: Zhejiang-Fujian hilly region; Soil derived from weathered granite; Laterite layer; Total carbon loss mass concentration; Rainfall simulation

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1]。土壤侵蚀是自然因素与人为因素综合作用的结果,其中,地面覆盖层、降雨强度和地面坡度是引起土壤侵蚀的主要因素,它们相互作用,相互制约。近年来,由于人类活动的增加加快了土壤侵蚀的速率,土壤侵蚀已经成为全世界最受关注的环境问题之一^[2]。土壤侵蚀造成基岩大面积露出,土地生产力下降,严重影响土壤碳素的富集^[3]。中国南方红壤丘陵地区是土壤侵蚀的重灾区,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;同时,坡度也是影响土壤侵蚀的重要因素之一,在同样的降雨强度下,不同坡度形成的坡面径流和壤中流也有很大不同,产生的土壤总碳含量的流失程度也有较大差别^[4-6]。

据国际碳循环计划组织(IPPC)的估计,土壤碳素损失对全球大气CO₂浓度升高的贡献率为30%~50%。损失的土壤碳素有50%~70%是由土壤侵蚀造成的。由此可见,土壤侵蚀中的土壤碳素流

失对于陆地生态系统和大气间的碳循环交换有着重要影响,在平衡全球CO₂浓度、气候变暖等方面起着重大作用^[7]。土壤总碳包括总有机碳与总无机碳,目前,国内外对降雨侵蚀导致土壤碳素流失的研究,主要集中于在坡度和降雨强度这两个影响因素下泥沙携带有机碳和径流中携带溶解性有机碳的研究,且多为随坡面径流或泥沙的流失。如Ma等^[8]在中国湖南红壤地区研究表明,在降雨过程中,随雨强增强,有机碳流失量增大;Truman等^[9]对格鲁吉亚砂壤土在雨强为57 mm·h⁻¹和春季特有暴雨下土壤中碳素的流失的结论表明,在模拟过程中观察到雨强对通过沉积物输送的碳损失的时间和数量存在显著差异;Jin等^[10]研究表明,土壤覆盖度越低,土壤有机碳流失量越高,土壤有机碳流失与土壤覆盖度呈显著负相关;Van Gaelen等^[11]对壤质土的研究表明,降雨强度是控制农田径流中溶解性有机碳(DOC)浓度的主要影响因子,且在降雨初期坡面径流中DOC质量浓度最高。

基于以上研究成果可知,对于坡度和雨强这两

个组合因素下,对土壤 TC 随坡面径流和壤中流流失的研究较少,尤其,针对特殊坡面物质组成—风化花岗岩母质坡地土壤中 TC 流失过程、以及随坡面径流和壤中流流失分配的动态过程的研究鲜见报道,且浙闽丘陵地区由于地处东南沿海地区,在夏秋季节,容易受到台风的影响,出现极端雨强^[12-13]。因此,本研究拟采用室内人工模拟降雨的方法对坡度和不同较大降雨强度的组合影响展开试验研究,通过测定降雨过程中径流过程特征、坡面径流和壤中流携带土壤总碳(Total carbon, TC)流失过程,获得径流量、坡面径流和壤中流携带土壤 TC 流失的动态曲线,并深入探讨坡度、雨强、径流量对土壤 TC 流失变化规律的影响机理,以期揭示侵蚀性风化花岗岩母质土壤 TC 的流失特征及影响因素,为浙闽丘陵地区的土壤养分流失和坡地土壤侵蚀防

治措施的合理配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤取自浙江省湖州市典型的风化花岗岩母质上发育的土壤(按地带性土壤而言,属于红壤),但由于严重的土壤侵蚀,表层被侵蚀夷尽,土壤的粗化现象非常严重,红土层暴露。采用原状土搬运的方式,在红土层区域从地表每隔 5 cm 分层采集土样装袋,共采集 12 层。在室内径流槽中对应层位填充,保证其土壤容重一致。然后搁置一段时间后,让其自然沉实(45 d)后,开始试验。试验之前,采集原状土测定各项指标,供试土壤指标见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils used in the experiment

土壤深度 Soil layer/ cm	容重 Soil bulk density/ (g·cm ⁻³)	pH	粒度组成 Grain composition			有机碳 Soil organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	总氮 Soil total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	总磷 Soil total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)
			黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%				
0~5	1.52	4.88	11.51	11.32	77.17				
5~10	1.51	4.49	10.97	14.39	74.64	6.46	0.72	1.65	
10~15	1.53	4.35	12.35	13.12	74.53	4.36	0.77	1.15	
15~20	1.60	4.30	11.54	14.57	73.89	2.03	0.62	1.58	
20~25	1.56	4.30	10.84	17.50	71.66	1.26	0.61	1.54	
25~30	1.61	4.17	12.75	15.83	71.42	1.25	0.59	1.59	
30~35	1.66	4.21	10.30	13.64	76.05	1.52	0.59	1.46	
35~40	1.60	4.12	10.64	16.42	72.94	1.51	0.66	1.41	
40~45	1.54	4.11	9.67	15.09	75.24	1.08	0.53	1.34	
45~50	1.70	4.12	10.20	13.97	75.83	1.03	0.43	1.31	
50~55	1.63	4.13	12.03	16.13	71.84	0.92	0.50	1.27	
55~60	1.73	4.10	10.88	14.58	74.55	0.59	0.42	1.34	

1.2 试验设计

于 2017 年 3 月 10 日至 7 月 28 日在浙江大学农业科学试验站(中国长兴)内的“浙江大学农业面源污染与水土流失控制人工模拟降雨试验基地”进行。试验采用变坡式壤中流三维立体模拟监测径流试验槽^[13],共采用两个径流槽,且两个径流槽并行

排列,径流槽规格长、宽、高分别为 2 m、1 m、0.6 m,采用液压装置来控制径流槽坡度,径流槽顶端有三角形出水口,用于接取坡面径流含沙水样,底端有三角形铁制集水槽且装有水龙头,用于接取壤中流水样(图 1)。每场降雨试验径流槽周围均匀放置 8 个雨量筒(直径:85 mm,高:200 mm)进行降雨

均匀度的测定,雨强则采用雨量筒进行标定。同时,每场降雨前采集土样并测定土壤前期含水量,以确保所有模拟试验土壤前期含水量相对一致。每场降雨试验结束后,均匀撒施 100 g 鸡粪有机肥 (TOC \approx 63%, TN+P₂O₅ + K₂O \approx 6.4%)。由于施肥量较大,所以每次模拟试验不能将所施肥料冲刷完全,因此在计算 TC 浓度数据时对其进行平衡计算,公式如下:

$$F_n = \sum_{i=1}^{n=20} B_f - \sum_{i=0}^{n=19} (D_w + S_d) + S_{\text{original}} - M_{\text{CO}_2}$$

$$C(\%) = \frac{B_f}{F_n} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{TC}_{\text{mc}} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = C(\%) \times \text{TC}_{\text{mcm}}$$

式中, F_n 为每场试验前土槽中所含 TC 总量, B_f 为每次试验前撒施肥料中 TC 含量, D_w 为前一次试验随径流流失 TC 总量, S_d 为前一次试验随泥沙流失 TC 总量, S_{original} 为原始土壤中 TC 总量, M_{CO_2} 为每场试验前 TC 矿化为 CO₂ 的流失量, $C(\%)$ 为还原系

数, TC_{mc} 为矫正 TC 质量浓度, TC_{mcm} 为测量所得 TC 质量浓度。

所用的人工模拟降雨器采用“QYJY-501 (502) 便携式全自动不锈钢模拟降雨器”,雨强由全自动降雨设备“控制器”控制,精度控制在 90%,降雨高度为 6 m,在 2 个槽的周围设置 8 个降雨喷头组 (3 个/组) 以保证降雨的均匀度 (图 1)。浙闽丘陵地区降雨强度大,坡地坡度变化范围大^[15],根据暴雨等级之间的差值等差平分规则、水土流失危险程度分级标准 (SL718—2015) 和浙闽丘陵具体坡度范围,共设计 3 个雨强和 4 个坡度,雨强分别为 90 (I90)、120 (I120) 和 150 mm·h⁻¹ (I150),坡度分别为 5° (G5)、8° (G8)、15° (G15) 和 25° (G25),共 12 场降雨试验。

设定降雨历时 90 min。产流开始后,每隔 3 min 用标有刻度的聚乙烯瓶子收集水样,降雨停止后坡面径流几乎同步停止,因此不再收集坡面径流。由于壤中流产流滞后且停雨后产流量大,经测试壤中流持续产流时间大概为 3 h,因此设定收集 60 个壤中流样品。

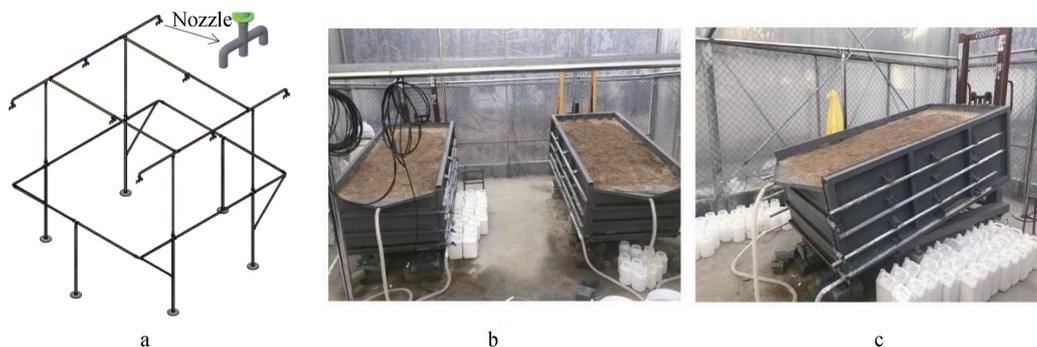


图 1 降雨器及试验径流槽示意图

Fig. 1 Sketch of rainfall simulation apparatus, rainfall simulator (a) and runoff plots (b, c)

1.3 样品分析与统计

试验结束,记录所有坡面径流以及壤中流样品径流量,由于径流量大,难于运输,因此每个水样摇匀后收集 250 mL 样品尽快送回实验室。25℃室温下样品静置 4~5 h 后,取上清液用 TOC 分析仪 (TOC-4200, Shimadzu Corp., Hong Kong, China) 进行水中 TC 质量浓度的测定,并通过计算得到 TC 流失率,公式如下:

$$\text{TC}_{\text{lr}} (\text{mg} \cdot 3\text{min}^{-1}) = \text{TC}_{\text{mc}} \times \text{RV} \quad (2)$$

式中, $\text{TC}_{\text{lr}} (\text{mg} \cdot 3\text{min}^{-1})$ 为每三分钟 TC 流失率, TC_{mc} 为矫正 TC 质量浓度, RV 为每三分钟测得的径流量。采用 SPSS 20.0 统计分析数据,并用 MATLAB 2017b 和 Origin 2016b 作图。

场降雨 TC 单位面积流失量计算公式为:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{TC}} \cdot V_{\text{R}}}{a_{\text{t}}} \quad (3)$$

式中, L 为单位面积 TC 流失量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; C_{TC} 为取样时间段内 TC 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V_{R} 为取样时间段内径流体积, L ; n 为场取样次数, 坡面径流为 30 次, 壤中流为 60 次; a_i 为径流槽受雨实际面积, m^2 。

2 结 果

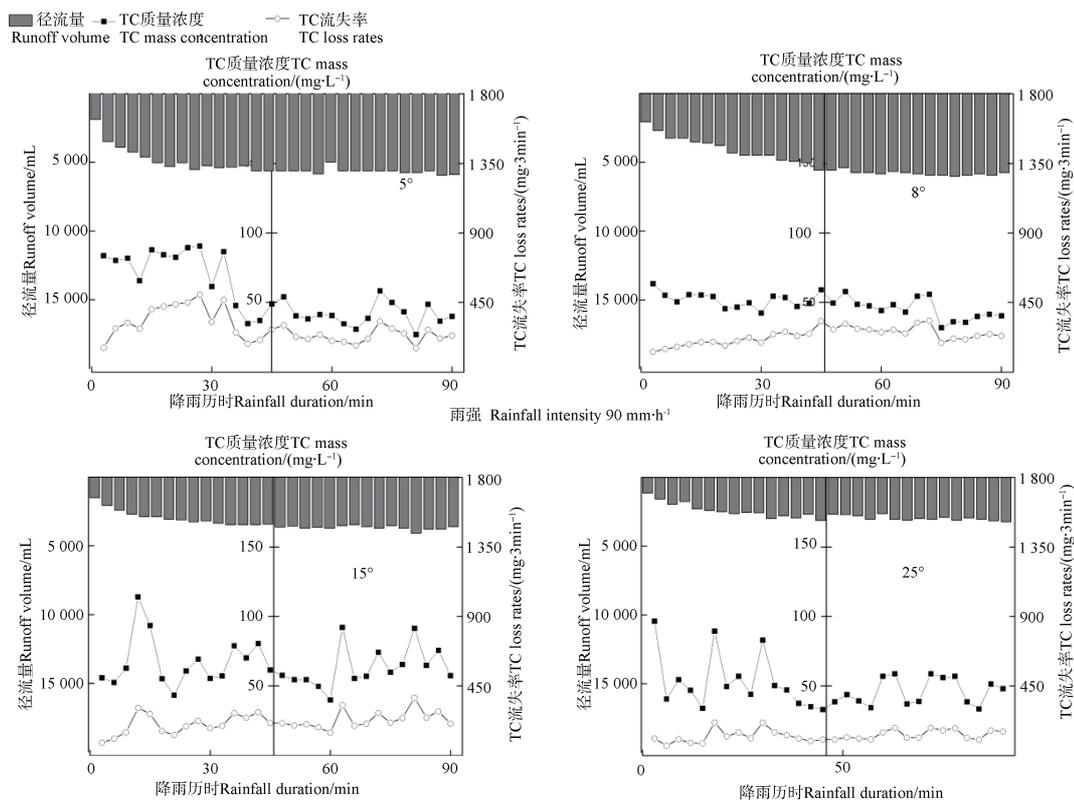
2.1 坡面径流中碳素流失过程随降雨历时的变化

各条件下坡面径流中碳素流失过程随降雨历时变化如图 2 所示, TC 质量浓度在 I90、I120 和 I150 时变化范围分别为 $27.00\sim 114.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $11.41\sim 118.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $13.22\sim 84.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由图 2 可知, 坡度和雨强的增大对碳素质量浓度变化过程影响较小, 在雨强为 I90 时, 随降雨历时的增大, TC 质量浓度一直趋于稳定, 在一定区域内波动, 而在 I120 和 I150 时, TC 质量浓度变化过程呈现为先波动上升后下降的过程, 但变化趋势相对不明显。对 TC 流失率进行分析, 流失率在 I90、I120 和 I150 时变化范围分别为 $21.32\sim 167.1\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $24.95\sim 257.6\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $38.68\sim 277.90\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$, 由图可知, 在不同坡度和雨强下, 流失率曲线与质量浓度曲线契合度较高, 且相关性分析表明 (表 2), 除 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强 8° 坡度条件外, TC 流失率与质量浓度随降雨历时的变化

均呈极显著相关, 说明 TC 流失率主要受质量浓度的影响, 径流量仅对其进行抬升和放大的作用, 但从流失总量看来, 径流量仍起主导作用。

2.2 壤中流中碳素流失随产流历时的变化

各条件下壤中流中碳素流失过程随降雨历时变化如图 3 所示, TC 质量浓度在 I90、I120、I150 时变化范围分别为 $0.54\sim 18.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.23\sim 18.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.17\sim 26.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由图 3 可知, 壤中流中 TC 质量浓度随产流历时的增加而增加, 先迅速上升到最大值后缓慢下降直至平稳, 变化趋势相对较为平缓, 但在坡度较小时 (5° 、 8°) 表现更加明显。对 TC 流失率进行分析, 流失率在 I90、I120、I150 时变化范围分别为 $0.073\sim 22.98\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.073\sim 15.31\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.013\sim 8.36\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$, 由表 2 可知, 在不同坡度和雨强下, 流失率曲线与质量浓度曲线随降雨历时的变化均呈极显著相关, 且当坡度较大时 (15° 、 25°) 契合度较坡度较小时 (5° 、 8°) 高。由图 3 可知壤中流中径流量曲线总体呈现出先上升后下降的过程, 其峰值取决于降雨结束的时间, 且由表 3 可得, 质量浓度曲线与流失率曲线相关性较径流量曲线与流失率曲线相关性好, 因此, 质量浓度仍是影响流失率曲线的最关键因子。



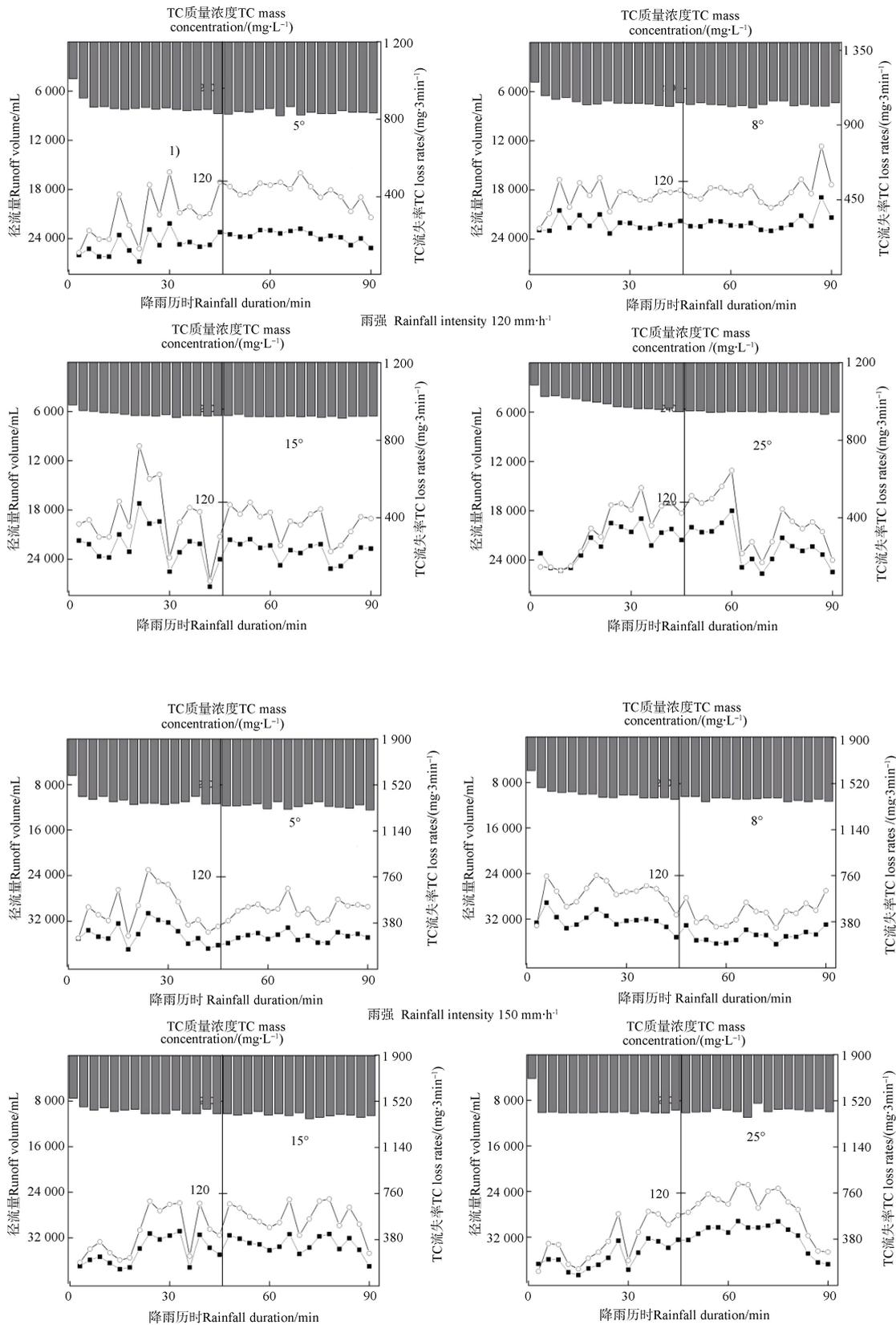


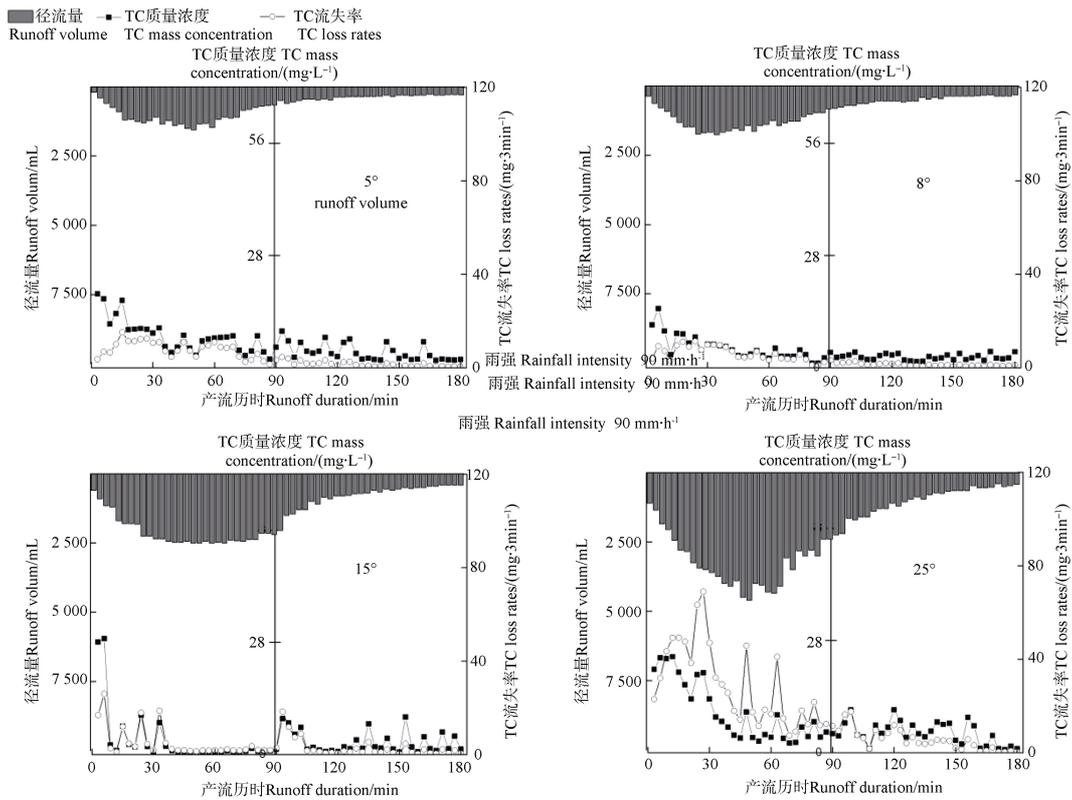
图 2 坡面径流碳素流失过程随降雨历时的变化

Fig. 2 Process of soil carbon loss with slope surface runoff during the rainfall event

表 2 流失率曲线与质量浓度和径流量曲线相关性系数

Table 2 Correlation analysis of TC loss rate curve with mass concentration and runoff curves

雨强 Rainfall intensity	坡度 Slope gradient	坡面径流 Surface runoff		壤中流 Interflow	
		质量浓度 Mass concentration/ (mg·L ⁻¹)	径流量 Runoff volume/ (mL·min ⁻¹)	质量浓度 Mass concentration/ (mg·L ⁻¹)	径流量 Runoff volume/ (mL·min ⁻¹)
90 mm·h ⁻¹	5°	0.847**	-0.329**	0.705**	0.803**
	8°	0.432	0.563**	0.735**	0.776**
	15°	0.829**	0.577**	0.840**	0.089
	25°	0.664**	0.359	0.813**	0.565**
120 mm·h ⁻¹	5°	0.979**	0.579**	0.887**	0.324*
	8°	0.920**	0.611**	0.934**	0.796
	15°	0.988**	0.034	0.780**	0.165
	25°	0.954**	0.523**	0.827**	0.443**
150 mm·h ⁻¹	5°	0.940**	0.409*	0.898**	-0.381**
	8°	0.907**	-0.036	0.917**	0.706**
	15°	0.990**	0.565**	0.953**	0.180
	25°	0.983**	0.245	0.888**	0.503**



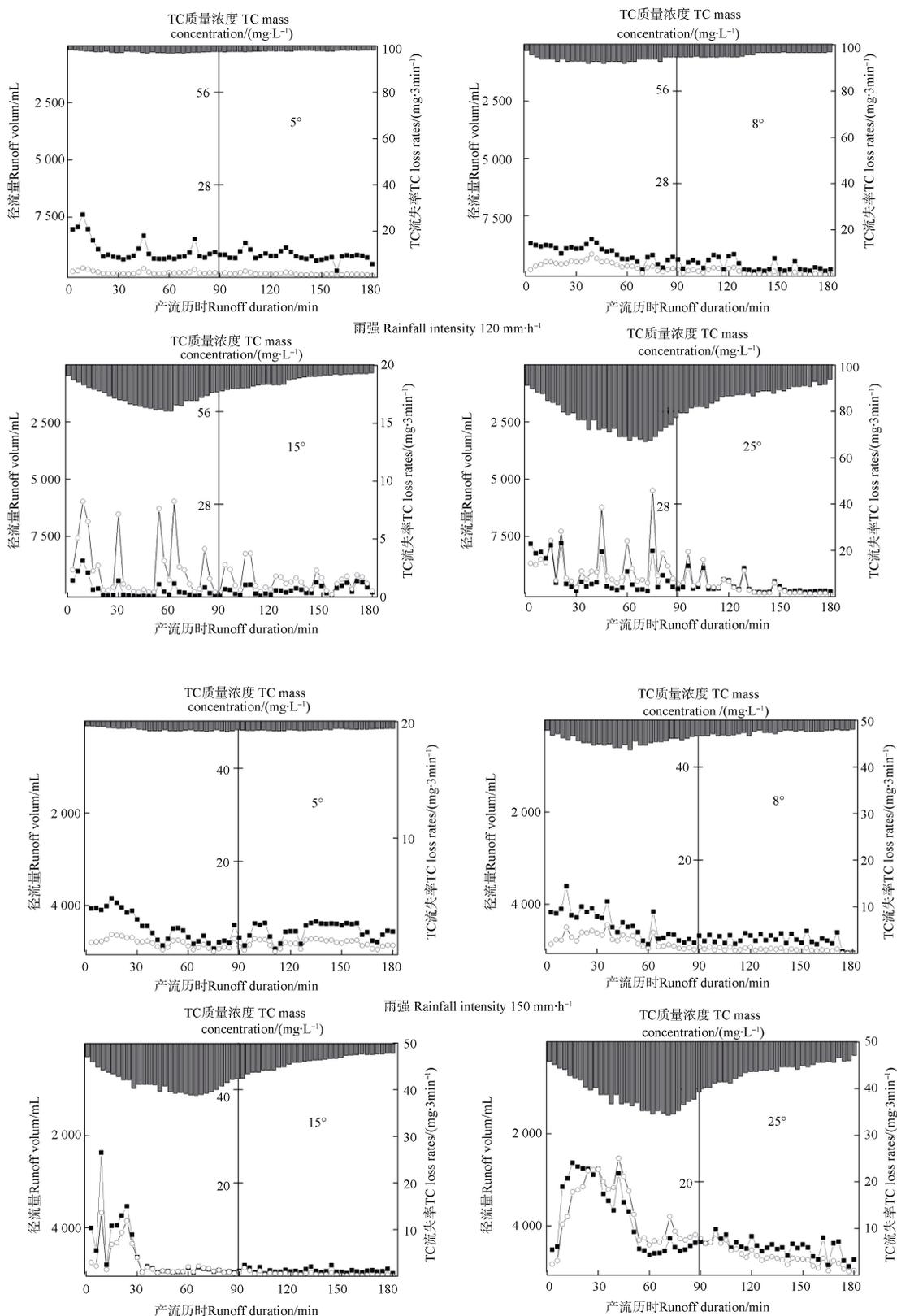


图 3 壤中流碳素流失过程随产流历时的变化

Fig. 3 Process of soil carbon loss with interflow during the rainfall event

表 3 TC 单位面积流失量与雨强的关系

项目 Project	坡度 Slope gradient	线性回归方程 Linear regression equation	决定系数 R^2
坡面径流 Surface runoff	5°	$M_S = 0.052r - 0.5512$	0.982 0
	8°	$M_S = 0.0741r - 2.6271$	0.858 1
	15°	$M_S = 0.0704r - 2.9137$	0.982 2
	25°	$M_S = 0.0884r - 5.7317$	0.970 1
壤中流 Interflow	5°	$M_I = -0.0018r + 0.2966$	0.914 4
	8°	$M_I = -0.0009r + 0.1994$	0.933 2
	15°	$M_I = -0.0011r + 0.2088$	0.826 1
	25°	$M_I = -0.0042r + 0.8476$	0.789 3
总量 Throughflow	5°	$M_T = 1.505r + 2.7555$	0.977 6
	8°	$M_T = 2.1945r + 1.9614$	0.852 9
	15°	$M_T = 2.0789r + 1.4529$	0.983 5
	25°	$M_T = 2.5252r + 0.1664$	0.975 5

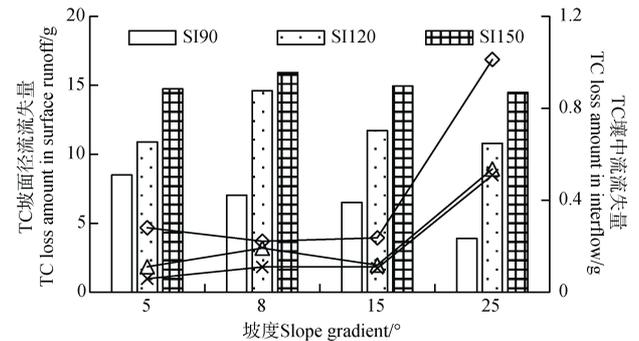
注： M_S 为坡面径流中 TC 流失量， M_I 为壤中流中 TC 流失量， M_T 为 TC 流失总量。Note: M_S was TC loss amount in surface runoff, M_I was TC loss amount in interflow, M_T was TC loss amount in total flow

2.3 雨强和坡度对坡面径流和壤中流中 TC 流失量的影响

2.3.1 雨强对径流中 TC 流失量的影响 通常认为，雨强是坡面养分流失的主要驱动因子，不同雨强下坡面养分流失量有较大差异。不同坡度下，径流中 TC 单位面积流失量与雨强的线性回归方程见表 3。在各坡度条件下，雨强与坡面径流、壤中流中 TC 单位面积流失量均有较强的线性关系。从回归方程可以看出，壤中流中 TC 单位面积流失量远小于坡面径流，图 4 也表明在坡面径流中 TC 远大于壤中流流失量。且由图 4 所示，坡面径流携带 TC 流失量随雨强的增大而增大，虽然壤中流中 TC 随雨强增大而减小，但由于数量级不同，所以随雨强的增大，TC 流失总量也随之增大。

2.3.2 坡度对径流中 TC 流失量的影响 由表 4 可以看出，在 I 90 时，坡度与 TC 单位面积流失量有较为明显的线性关系。而当雨强增大时，TC 单位面积流失量和坡度的线性关系明显减弱。本研究发现，在出现极端雨强时，8° 时坡面径流中 TC 单位面积流失量最大。壤中流中，随着雨强的增大，坡度与 TC 单位面积流失量的线性关系明显增加，在 II 50 时， R^2 达到 0.829，但由于对壤中流中 TC 流失机制尚不明确，因此该机理尚待考究。此外，对比表 3 和表 4 中 TC 流失总量直线斜率的变化可以看出，雨强相较于坡度，对 TC 单位

面积流失量有更大的影响。



注：S 前置为坡面径流 TC 流失量，I 前置为壤中流 TC 流失量
Note: pre-S is TC loss amount in surface runoff, pre-I is TC loss amount in interflow

图 4 径流中 TC 流失总量

Fig. 4 Gross TC loss amount with runoff

2.3.3 雨强和坡度对径流中 TC 流失的综合影响

不同坡度和雨强下，红土层裸地径流中的 TC 流失量有显著差别，因此本文考察了雨强和坡度对 TC 单位面积流失量的综合影响（表 5），坡面径流中雨强、坡度和 TC 单位面积流失量的线性相关性很好， R^2 达到 0.898，而壤中流 R^2 仅为 0.724；从雨强和坡度的参数来看，在坡面径流中，指定雨强和坡度范围内，雨强对 TC 流失的影响大于坡度，而在壤中流中，二者相反。

表 4 TC 单位面积流失量 (M) 与坡度 (s) 的关系

Table 4 Relationships between TC loss (M) per unit area and slope gradients (s) relative to rainfall intensity

项目 Project	雨强 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)	线性回归方程 Linear regression equation	决定系数 R ²
坡面径流 Surface runoff	90	$M_S = -0.1052s + 4.6391$	0.9497
	120	$M_S = -0.04s + 6.5366$	0.1590
	150	$M_S = -0.0181s + 7.7588$	0.2681
壤中流 Interflow	90	$M_I = 0.1109s - 0.058$	0.5532
	120	$M_I = 0.0603s - 0.031$	0.5946
	150	$M_I = 0.0108s - 0.0455$	0.8293
总量 Throughflow	90	$M_T = -0.0865s + 4.6105$	0.9299
	120	$M_T = -0.0303s + 6.5276$	0.096
	150	$M_T = -0.0073s + 7.7133$	0.056

注: M_S 为坡面径流中 TC 流失量, M_I 为壤中流中 TC 流失量, M_T 为 TC 流失总量。Note: M_S was TC loss amount in surface runoff, M_I was TC loss amount in interflow, M_T was TC loss amount in total flow.

表 5 雨强和坡度与 TC 单位面积流失量之间的关系

Table 5 Relationships of TC loss (M) per unit area with rainfall intensity (r), slope gradient (s)

项目 Project	线性回归方程 Linear regression equation	决定系数 R ²
坡面径流 Surface runoff	$M_S = 0.071r - 0.054s - 2.234$	0.898
壤中流 Interflow	$M_I = -0.002r + 0.013s + 0.215$	0.724
总量 Throughflow	$M_T = 0.069r - 0.041s - 2.020$	0.897

注: M_S 为坡面径流中 TC 流失量, M_I 为壤中流中 TC 流失量, M_T 为 TC 流失总量。Note: M_S was TC loss amount in surface runoff, M_I was TC loss amount in interflow, M_T was TC loss amount in total flow.

根据前人的成果, 径流量一直是坡面污染物或者营养元素流失的主要因素^[16-18]。由于雨强、坡度直接影响裸地径流量, 为了能够通过径流量预测裸地的碳素单位面积流失量, 本文研究了次降雨径流量与径流 TC 单位面积流失量之间的关系, 结果见表 6。结果表明, 坡面径流中径流量与

TC 单位面积流失量之间存在显著的线性关系, R^2 达到了 0.853, 这也与其他相关结论相似, 但在壤中流中这种线性关系不存在, 但由于 TC 随壤中流单位面积流失量相对较小, 对总量分析, 线性方程仍能较好地解释 TC 单位面积流失量与径流量的关系。

表 6 次降雨径流量和 TC 单位面积流失量之间的关系

Table 6 Relationships between TC loss (M) per unit area and runoff volume (v) in each rainfall event

项目 Project	线性回归方程 Linear regression equation	决定系数 R ²
坡面径流 Surface runoff	$M_S = 0.021v_S + 1.079$	0.853
壤中流 Interflow	$M_I = -0.036v_I + 7.583$	0.459
总量 Throughflow	$M_T = 0.028v_T - 1.632$	0.800

注: M_S 为坡面径流中 TC 流失量, M_I 为壤中流中 TC 流失量, M_T 为 TC 流失总量, v_S 为坡面径流量, v_I 为壤中流流失量, v_T 为径流总量。Note: M_S was TC loss amount in surface runoff, M_I was TC loss amount in interflow, M_T was TC loss amount in throughflow, v_S was the volume of surface runoff, v_I was the volume of interflow, v_T was the volume of throughflow.

表 5 中的线性回归方程可用于预测不同雨强、坡度条件下浙闽丘陵地区红土层裸地坡面径流或壤中流中碳素的流失量。当已知某次降雨的径流总量时, 则可采用表 6 中的方程来预测 TC 流失量。以上方程为预测一定条件下浙闽丘陵区红土层裸地径流中 TC 流失量提供了简便的计算方法和科学基础, 对碳素流失模型预测及面源污染控制有重要意义。

3 讨 论

3.1 不同土壤类型对径流中碳素流失质量浓度的影响

在坡面径流中, 本研究表明, 随着降雨时长的增加, TC 质量浓度变化不明显, 呈现出在一定区域内波动的特征, 这与其他土壤类型的研究有较大的不符^[19-21], 在降雨初期, 由于降雨初始冲刷效应的存在, 此时 TC 质量浓度应该是最高的, 但本研究得出的结论与其相悖, 究其原因, 可能是红土层由于缺乏有机质, 土壤结构体多为块状和核状结构, 难以被雨滴溅蚀破坏, 因此, 降雨初期未出现降雨初始冲刷效应。而初期降雨后, 雨水对裸地地面的冲刷基本稳定, 同时由于土壤表层被压实并形成水膜, 因此径流携带的 TC 浓度也基本稳定^[22]。但本研究发现, TC 质量浓度曲线会在一定范围内出现较大的波动, 其突变的原因可能是碳在径流中的溶解时间不确定, 溶解率也就不尽相同, 此时质量浓度就会波动, 但该结论没有得到证实, 但在其他研究中对其他营养元素变化曲线也发现了该特征^[23-24]。

在壤中流中, TC 质量浓度曲线总体随产流历时的增加, 先迅速上升达到最大值后缓慢下降直至平稳的趋势, 产生这种现象的原因是壤中流产流初期, 流速缓慢, 虽然下渗过程中与土壤进行了充分的相互作用, 但由于可溶性的碳素相对较少^[25], 因此产流初期浓度较低, 而随着产流量的增加, 流速不断增大, 达到部分颗粒态碳的起动流速, 因此质量浓度增大, 而随着降雨结束, 流速缓慢减小, 随壤中流流失的 TC 质量浓度也缓慢下降直至平稳。壤中流中 TC 质量浓度曲线也出现了较大的波动, 且波动范围大于坡面径流, 本研究认为此现象与流速有关, 已经有很多研究表明养分流失随着流速的增加而增加^[26-27], 由于土体内部结构错综复杂, 壤中流流动路径较坡面径流复杂, 因此流速变化范围较大,

从而导致壤中流中 TC 质量浓度曲线出现较大波动。国内外 TC 随壤中流流失的研究还鲜有报道, 这可能是坡面径流(主要是溶解态和悬浮颗粒态)和侵蚀泥沙(主要是粗颗粒态)是碳素等营养元素迁移的主要途径与形态^[28-29], 但本研究认为壤中流中碳素流失(主要是溶解态)对农业养分的影响也不容忽视。此外, 由图 4 可知, 随着雨强的增大, 壤中流则越小, 这是由于雨强增大时, 雨滴击打表层泥沙的强度大, 泥沙溅蚀量增多, 土壤结皮更容易形成^[30-31], 因此入渗率逐渐下降。

3.2 雨强和坡度对碳素随径流流失的影响评估

雨强对坡面养分流失的影响主要为影响其径流量^[32]。有研究表明, 大雨强时雨滴的直径大而且下落的终极速度随之加大, 对坡面土壤产生较大的打击和溅蚀作用, 导致坡面地表结皮, 更容易形成坡面径流, 此时壤中流流量随之减少, 壤中流中 TC 单位面积流失量也相应减少, 且溶解态的碳素相对较少, 壤中流流速较慢, 颗粒态碳难以被携带移动, 所以随壤中流流失的 TC 相对很少^[33-34]。因此, 在本试验中, 随着雨强的增大, 坡面径流中碳素流失量逐渐增大, 而壤中流中碳素流失量逐渐减小。

在大雨强下, 坡度对径流中碳素流失的影响不明显, 这是因为, 雨强增大到一定程度, 土壤被剧烈冲刷的同时产生大量径流, 径流流速快, 使表层土壤颗粒物被迅速带入径流流失, 这时坡度对流速的影响逐渐减小^[35], 由于流量少, 红土层壤中流中碳素的流失量较小, 坡面径流是碳素迁移的主要因素, 这个特性是由土壤质地决定的, 红土层土壤质地较紧实, 而在紫色土以及本课题组前期研究的风化花岗岩母质土壤等土壤质地较松散的土壤种类中, 养分随壤中流流失的占比则相对较高, 甚至达到 90%以上^[15, 36]。

4 结 论

在雨强为 90、120 和 150 mm·h⁻¹ 和坡度为 5°、8°、15°和 25°条件下, 雨强和坡度增大对坡面径流碳素质量浓度变化过程影响较小, 质量浓度曲线是影响流失率曲线的主要因素。在雨强为 90、120 和 150 mm·h⁻¹ 和坡度为 5°、8°、15°和 25°条件下, 壤中流中 TC 质量浓度曲线呈现出迅速上升达到最大值后缓慢下降直至平稳的趋势, 且质量浓度曲线与

流失率曲线相关性相对坡面径流较差。雨强越大,坡面径流中 TC 流失量和 TC 总流失量越大,壤中流中 TC 流失量减少,且雨强相较于坡度,对 TC 流失量有更大的影响,壤中流中坡度对 TC 流失量的影响大于雨强。径流碳素流失量与雨强、坡度以及次降雨径流量之间有明显的线性关系,可以建立预测红土层裸地径流中碳素流失量方程。

参考文献 (References)

- [1] Morgan R P C. Soil erosion and conservation[J]. *Earth Science Reviews*, 1985, 24 (1): 68—69.
- [2] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 35 (12): 1456—1467.
- [3] 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.
- [4] Chen Y H, Chen M H, Wang G, et al. Effects of slopes on nitrogen transport along with runoff from sloping plots on a lateritic red soil amended with sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (10): 2423—2430. [陈炎辉, 陈明华, 王果, 等. 不同坡度地表径流中污泥氮素流失规律的研究[J]. *环境科学*, 2010, 31 (10): 2423—2430.]
- [5] Geng X D, Zheng F L, Li L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010, 35 (6): 48—53. [耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010, 35 (6): 48—53.]
- [6] Li R J, Zhang Y J, Zhao M, et al. Simulation on the effects of slope and rainfall on soil CO₂ flux and SOC loss[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (4): 1336—1342. [李如剑, 张彦军, 赵慢, 等. 坡度和降雨影响土壤 CO₂ 通量和有机碳流失的模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (4): 1336—1342.]
- [7] Hou Y. Review of effects of urbanization on soil respiration[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2011, 20 (12): 1945—1949. [侯颖. 城市化对土壤呼吸作用影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20 (12): 1945—1949.]
- [8] Ma T, Mi C, Lu Z, et al. Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of landslides in Zhejiang Province, China[J]. *Geomorphology*, 2015, 245 : 193—206.
- [9] 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[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36 (5): 1495.
- [10] Jin K, Cornemis W M, Gabrie M S D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses[J]. *Catena*, 2009, 78 (1): 81—86.
- [11] Van Gaelen N, Verschoren V, Clymans W, et al. Controms on dissolved organic carbon export through surface runoff from loamy agricultural soils[J]. *Geoderma*, 2014, 226 : 387—396.
- [12] Wang J A, Lei Y D, Zhou H J, et al. Regional features and adaptation countermeasures of typhoon disaster chains in southeast coastal regions of China[J]. *Journal of Beijing Normal University(Social Sciences)*, 2012(2): 130—138. [王静爱, 雷永登, 周洪建, 等. 中国东南沿海台风灾害链区域规律与适应对策研究[J]. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2012 (2): 130—138.]
- [13] Wen W J. The comparisons between calculated wind wave factors of inland lakes with different methods[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. [文武健. 应用不同方法计算内陆湖泊风浪要素的比较[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.]
- [14] 张丽萍, 张锐波, 邬燕虹. 一种变坡式壤中流三维立体模拟监测径流试验槽[S]. 浙江: CN206096119U, 2017—04—12
- [15] Wu Y H, Zhang L P, Deng L Z, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on nitrogen loss under artificial simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (2): 27—33. [邬燕虹, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (2): 27—33.]
- [16] Kleinman P J, Sharpley A N, Veith T L, et al. Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed soil boxes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33 (4): 1413.
- [17] Tao W, Wang Q, Min H. An approximate analytical solution for describing surface runoff and sediment transport over hillslope[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 496—508.
- [18] Niu J, Zhang P C, Xing M X. Characteristics of soil and water loss on purple slope farmland and its control in upper reaches of the Yangtze River[J]. *Science of Soil & Water Conservation*, 2010, 8 (6): 64—68. [牛俊, 张平仑, 邢明星. 长江上游紫色土坡耕地水土流失特征及其防治对策[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (6): 64—68.]
- [19] Chen L, Liu D F, Song L X, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities[J]. *Environment Science*, 2013, 34 (6): 2151—2158. [陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34 (6): 2151—2158.]
- [20] Gao Y, Zhu B, Wang T, et al. Purple soil sloping land bio-available phosphorus transported out under the condition of artificial simulated rainfall[J]. *China*

- Environmental Science, 2008, 28 (6): 542—547. [高扬, 朱波, 汪涛, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 542—547.]
- [21] Wu L, Peng M, Qiao S, et al. Assessing impacts of rainfall intensity and slope on dissolved and adsorbed nitrogen loss under bare loessial soil by simulated rainfalls[J]. Catena, 2018, 170: 51—63.
- [22] Zhu Y D, Cai Q G, Hu X, et al. Effects of soil physical and chemical properties on soil crustiong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (1): 13—19. [朱远达, 蔡强国, 胡霞, 等土壤理化性质对结皮形成的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41 (1): 13—19.]
- [23] Xue P C, Pang Y, Xiang S, et al. Nitrogen loss characteristics of farmland runoff under simulated precipitation conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36 (7): 1362—1368. [薛鹏程, 庞燕, 项颂, 等. 模拟降雨条件下农田氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (7): 1362—1368.]
- [24] Wang G, Wu B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180—191.
- [25] Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (12): 6165—6171. [汪景宽, 李丛, 于树, 等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性[J]. 生态学报, 2008, 28 (12): 6165—6171.]
- [26] Zhong X Y, Wang C H, Yu C R, et al. Characteristics of sediments and nutrient release under different flow velocity[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2862—2869.
- [27] Xia L, Liu G, Chen C, et al. Red soil for sediment capping to control the internal nutrient release under flow conditions[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10 (6): 14.
- [28] Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (6): 1235—1240. [吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. 土壤学报, 2012, 49 (6): 1235—1240.]
- [29] Su J J. The export and algal availability of sediment-associated phosphorus in agricultural catchments in eastern Canada[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. [苏静君. 加拿大东部农田流域颗粒态磷的输出及藻类有效性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.]
- [30] Wu F Q, Fan W B. Study on relationship of soil crust and rainfall splash[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (3): 1—3. [吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15 (3): 1—3.]
- [31] Cheng Q J, Cai Q G, Li J Y. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion[J]. Progress in Geography, 2005, 24 (4): 114—122. [程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24 (4): 114—122.]
- [32] Tang S S, Li P, Ren Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1): 39—47. [汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53 (1): 39—47.]
- [33] Deng L Z, Zhang L P, Fan X J, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 143—150. [邓龙洲, 张丽萍, 范晓娟, 等. 不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (17): 143—150.]
- [34] Liu H P, Fu S H, Wang X Y, et al. Effects of slope gradient on raindrop splash erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (3): 479—486. [刘和平, 符素华, 王秀颖, 等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究[J]. 土壤学报, 2011, 48 (3): 479—486.]
- [35] Yuan X, Pan Z C, Li M, et al. Influence of rainfall intensity and slope gradient on suspended substance and phosphorus losses in runoff[J]. China Environmental Science, 2016, 36 (10): 3099—3106. [袁溪, 潘忠成, 李敏, 等. 雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (10): 3099—3106.]
- [36] Wang T, Zhu B. Reducing interflow nitrogen loss from hillslope cropland in a purple soil hilly region in Southwestern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 93 (3): 285—295.

(责任编辑：檀满枝)