

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0573

李如剑, 张彦军, 赵慢, 等. 2016. 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, 36(4): 1336–1342

Li R J, Zhang Y J, Zhao M, et al. 2016. Simulation on the effects of slope and rainfall on soil CO₂ flux and SOC loss [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(4): 1336–1342

坡度和降雨影响土壤 CO₂ 通量和有机碳流失的模拟研究

李如剑¹, 张彦军¹, 赵慢², 杜兰兰¹, 王志齐¹, 郭胜利^{1,2,3,*}

1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

收稿日期: 2015-06-24

修回日期: 2015-07-18

录用日期: 2015-07-20

摘要: 坡度和降雨是影响土壤侵蚀发生和发展的重要因素, 分析二者对土壤 CO₂ 通量变化的影响, 有助于深入理解侵蚀条件下土壤和大气 CO₂ 之间交换的机理. 选取黄土高原典型侵蚀性土壤黄绵土, 于中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅, 研究不同坡度 (5°、15° 和 25°)、降雨强度 (30、60 和 90 mm·h⁻¹, 即 I_{30} 、 I_{60} 、 I_{90}) 及历时 (0.5、1 和 1.5 h, 即 $H_{0.5}$ 、 H_1 、 $H_{1.5}$) 下土壤 CO₂ 通量变化. 结果表明: 同历时和雨强下, 坡度显著影响土壤 CO₂ 通量变化 ($p < 0.001$), 且各坡度下土壤 CO₂ 通量呈现出 5° > 15° > 25° 的趋势, 但 5° 与 15° 之间差异未达到显著水平, 而 25° 坡度下土壤 CO₂ 通量较 5°、15° 下显著下降 (16.3% ~ 36.5%, 10.8% ~ 27.1%); 同坡度和历时 (H_1) 下, 随着雨强的增加, 土壤 CO₂ 通量呈现下降的趋势, 相较 I_{30} 雨强下, I_{60} 、 I_{90} 雨强下对应坡度的土壤 CO₂ 通量降低了 2.3% ~ 14.3%, 但差异均未达到显著性水平; 同坡度和雨强 (I_{90}) 下, 随着历时的增加, 土壤 CO₂ 通量也表现出降低的趋势, H_1 、 $H_{1.5}$ 历时下, 土壤 CO₂ 通量相较 $H_{0.5}$ 下降 1.7% ~ 20.9%, 历时对土壤 CO₂ 通量影响达显著性水平 ($p < 0.1$); 土壤 CO₂ 通量的变化与坡面 SOC 流失量呈线性负相关关系 ($R^2 = 0.69 \sim 0.77$, $r = -0.83 \sim -0.88$, $p \leq 0.1$). SOC 的流失是导致坡面土壤 CO₂ 通量降低的重要因素.

关键词: 土壤侵蚀; 土壤 CO₂ 通量; 坡度; 雨强; 历时

文章编号: 0253-2468(2016)04-1336-07

中图分类号: X53

文献标识码: A

Simulation on the effects of slope and rainfall on soil CO₂ flux and SOC loss

LI Rujian¹, ZHANG Yanjun¹, ZHAO Man², DU Lanlan¹, WANG Zhiqi¹, GUO Shengli^{1,2,3,*}

1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100

2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100

Received 24 June 2015;

received in revised form 18 July 2015;

accepted 20 July 2015

Abstract: Slope and rainfall are the key factors to influence detachment, transport and deposition of soil materials by the erosive forces of raindrops and runoff. The investigation of soil CO₂ flux under slope and rainfall is helpful to understand the CO₂ exchange mechanism between soil and atmosphere in the eroded region. A simulated experiment of rainfall and slope was conducted in State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau. The treatments consist of three slopes (5°, 15° and 25°), three rainfall intensities (30, 60 and 90 mm·h⁻¹, I_{30} , I_{60} and I_{90}) and three rainfall durations (0.5, 1 and 1.5 h, $H_{0.5}$, H_1 and $H_{1.5}$). Soil CO₂ flux significantly decreased as the slope increased ($p < 0.001$), but there was no significant difference between 5° and 15°. Soil CO₂ flux with slope 25° was declined significantly compared to 5° and 15° (16.3% ~ 36.5%, 10.8% ~ 27.1%). For the same slope and rainfall duration (H_1), soil CO₂ flux decreased with the increase of rainfall intensity. Compared with the I_{30} , the soil CO₂ flux of I_{60} and I_{90} decreased by 2.3% ~ 14.3%, but the difference did not reach the significant level. With the increase of rainfall duration, soil CO₂ flux also showed a reduced tendency under the same slope and rainfall intensity (I_{90}). Compared with $H_{0.5}$, the soil CO₂ flux of H_1 and $H_{1.5}$ decreased by 1.7% ~ 20.9%, and the rainfall duration had a significant influence on the soil CO₂ flux. With the increase of slope, rainfall intensity and rainfall duration, the loss content of SOC had increased significantly ($p < 0.1$). There were negative linear correlation between soil CO₂ flux and SOC losses ($R^2 = 0.69 \sim$

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41371279)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41371279)

作者简介: 李如剑 (1990—), 女, E-mail: lirujian1990@126.com; * **通讯作者 (责任作者)**, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

Biography: LI Rujian (1990—), female, E-mail: lirujian1990@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

0.77, $r = -0.83 \sim -0.88$, $p \leq 0.1$). SOC loss contribute significantly to the decline in soil CO₂ flux during an erosion event.

Keywords: soil erosion; soil CO₂ flux; slope; rainfall intensity; rainfall duration

1 引言(Introduction)

土壤 CO₂ 通量是土壤有机碳(Soil Organic C, SOC) 库的重要输出途径,也是全球碳循环的重要组成部分(Singh *et al.*, 1977; Schlesinger *et al.*, 2000). 每年通过土壤释放的 CO₂ 是燃烧化石燃料贡献量的近 10 倍(Grace *et al.*, 2000), 约占大气 CO₂ 的 10%(Raich *et al.*, 1995). 在侵蚀条件下, SOC 通过泥沙(Lal, 2004) 和 SOC 的矿化分解(Lal, 2003) 两种途径流失. 目前, 侵蚀条件下 SOC 流失的组分、强度及其途径已有大量研究. 例如, 侵蚀泥沙迁移过程中, 细颗粒、低密度的 SOC 组分被优先选择(Gregorich *et al.*, 1998), 轻组 SOC 显著积累与泥沙中 SOC 的富集密切相关(Jacinthe *et al.*, 2004); 侵蚀主要影响表层 SOC 流失, Zhang 等(2015) 发现严重侵蚀使得表层 SOC 含量降低了 59.7%, Nie 等(2013) 也得到了相似的结论; 贾松伟(2009) 研究发现, 坡度由 10° 增加到 20°, 侵蚀的加剧导致 SOC 流失量增加达 6.3 倍; 聂小东等(2013) 研究指出, 雨强增加 1.6 倍, SOC 流失量增加了近 3.2 倍. 侵蚀过程中, SOC 因矿化分解变化导致的碳流失也不容忽视. 有学者在研究侵蚀发生时发现, 被团聚体保护的 SOC 充分暴露(Mora *et al.*, 2007), 土壤水热条件也随之变化(Bajracharya *et al.*, 2000), 使得 SOC 矿化分解速率受到影响. 因此, 尽管土壤 CO₂ 通量是 SOC 变化的中间过程, 但它也反映了 SOC 储量变化的重要信息. 从土壤 CO₂ 通量变化角度研究侵蚀区土壤碳循环, 有助于深入理解侵蚀条件下陆地生态系统碳循环机理.

因此, 本研究选取黄土高原沟壑区王东沟小流域梁坡耕地表层(0~20 cm) 黄绵土, 通过室内人工模拟降雨试验, 分析不同坡度(5°、15°和 25°)、降雨强度(30、60 和 90 mm·h⁻¹, 即 I_{30} 、 I_{60} 、 I_{90}) 及降雨历时(0.5、1 和 1.5 h, 即 $H_{0.5}$ 、 H_1 、 $H_{1.5}$) 对土壤 CO₂ 通量变化的影响, 为评价土壤侵蚀影响土壤 CO₂ 通量的机理提供新思路 and 理论依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 试验材料

试验于 2014 年 7—10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅开

展. 降雨设备为中国科学院水利部水土保持研究所研制的自动控制降雨强度的侧喷式人工降雨装置, 实际降雨高度为 16 m, 雨滴直径、雨滴分布及雨滴达到的终点速度均可以满足天然降雨特性, 降雨均匀度大于 80%, 降雨强度变化范围为 40~260 mm·h⁻¹, 最大持续降雨时间 12 h, 有效降雨面积 4 m×9 m(周佩华等, 2000; 郑粉莉等, 2004).

供试土壤取自陕西省长武县王东沟小流域(107°40′~107°42′ E, 35°12′~35°16′ N) 梁坡地耕层土壤(0~20 cm). 土壤类型为黄绵土, 其基本理化性质为: 有机碳 7.06 g·kg⁻¹, 土壤容重 1.30 g·cm⁻³, 土壤颗粒组成中, 粘粒(< 0.002 mm) 占 17.77%, 粉粒(0.05~0.002 mm) 占 74.72%, 砂粒(2~0.05 mm) 占 7.51%.

2.2 试验设计

试验小区为 6 个长 1 m、宽 0.4 m、高 0.35 m 的自制移动式可变坡钢槽. 依据我国典型的侵蚀性降雨标准(单次降雨量超过 10 mm), 设置 5°、15°、25°三个坡度, 3 次重复. 共进行 5 场降雨, 分别为降雨历时 1 h, 降雨强度分别为 30、60、90 mm·h⁻¹ (分别记为 H_1-I_{30} 、 H_1-I_{60} 、 H_1-I_{90}), 以及降雨强度 90 mm·h⁻¹, 历时分别为 0.5 h、1.5 h (分别记为 $H_{0.5}-I_{90}$ 、 $H_{1.5}-I_{90}$).

供试土壤自然风干, 去除植物残体和根系, 过 2 mm 筛后, 分 4 层(每层 5 cm) 填装, 土壤容重控制在 1.25~1.35 g·cm⁻³ 之间. 装土之前先在各试验小区底部铺设厚 10 cm 的天然细沙, 用透水纱布覆盖, 以模拟天然坡面的透水状况. 填装下一层土壤之前将表土打毛, 以消除两层土壤之间的垂直层理. 为了降低土壤装填的变异性, 试验前进行 30 mm·h⁻¹ 的预降雨, 降雨时间控制在产流刚出现时为止(静置 24 h 后, 再进行正式降雨).

降雨过程中, 记录产流时间, 从产流开始后, 利用直径 20 cm、高 35 cm 的径流桶以 10 min 为间隔, 承接径流样. 每场降雨后约 30 min, 将 3 个直径 20 cm、高 5 cm 的 PVC 基座砸入各试验小区, 基座出露地面 1 cm, 用于土壤 CO₂ 通量的测定.

2.3 试验方法

2.3.1 土壤 CO₂ 通量、水分、温度的测定 基座稳定 24 h 后, 利用 Li-8100 系统(Li-COR, Lincoln, NE, USA) 连续测定土壤 CO₂ 通量一周, 测定时间为

上午 9:00—11:00, 这个时间段土壤 CO_2 通量能够代表全天的平均值 (Iqbal *et al.*, 2010). 每个基座上连续测定两次, 两次测定值差值控制在 $\pm 0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之内. 采用数字显示温度计 (Li-Cor thermocouple probe) 测定土壤 5 cm 温度, 便携式水分仪 (Theta Probe ML2X with an HH2 moisture meter Delta-T Devices, Cambridge, England) 测定土壤 0 ~ 5 cm 水分, 各取 3 次重复. 土壤 CO_2 通量、温度和水分同步监测.

2.3.2 泥沙样的测定 静置 24 h 后, 用洗耳球小心吸走径流桶内上层清液, 并用刷子将桶内泥沙全部转移至直径 10 cm、高 10 cm 的钢钵中, 40 °C 烘干至恒重后, 千分位天平称重, 计算泥沙量; 泥沙有机碳含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定.

2.4 数据处理

由于试验持续时间较长、天气变化显著, $H_1\text{-}I_{60}$ 及 $H_{1.5}\text{-}I_{90}$ 这两场降雨的温度明显降低, 而土壤温度是影响土壤 CO_2 通量的主控因素, 为了排除温度的干扰, 依据土壤 CO_2 通量与土壤温度的指数关系模型 (严俊霞等, 2010), 将同历时 (H_1) 的 3 场降雨及同雨强 (I_{90}) 的 3 场降雨分别进行校正, 以便分析雨强、历时对土壤 CO_2 通量的影响, 校正模型如下:

$$F_{30} = F_T e^{\beta_1(30-T)} \quad (1)$$

式中, F_{30} 为土壤温度校准到 30 °C 时的土壤 CO_2 通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), F_T 为土壤温度为 T °C 时的实测

土壤 CO_2 通量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为实测土壤温度 (°C).

土壤充气孔隙 (Soil Water-filled Pore Space, WFPS) 由下列方程计算获得:

$$\text{WFPS} = 100\% \times [\theta_v / (2.65 - \rho_b) / 2.65] \quad (2)$$

式中, θ_v 是体积含水量, ρ_b 是土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 2.65 是土壤密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

利用 Excel 软件进行数据的预处理, 数据方差分析采用 SAS 软件 (SAS 6.12), 当 F 检验显著时, 进行均值间 LSD 显著性检验, 在 3 个水平下 (0.001, 0.05 和 0.1) 进行了方差分析. 用 SigmaPlot 软件绘制不同坡度、雨强及历时下 SOC 流失量、土壤 CO_2 通量变化图及二者关系图.

3 结果 (Results)

3.1 坡度和降雨对有机碳流失量的影响

坡度、降雨、历时对 SOC 流失量的影响均达到显著水平 ($p < 0.001$) (图 1). 同历时和雨强下 (即同一场降雨内, 下同), 3 个坡度下的 SOC 流失量之间差异显著: 相较于 5° 下的 SOC 流失量, 15° 和 25° 下的 SOC 流失量显著增加 ($p < 0.001$), 增加幅度分别达 56.1% ~ 336.4%、74.9% ~ 972.7%; 而 15° 和 25° 之间的 SOC 流失量差异相对较小 (6.1% ~ 145.8%), 降雨 $H_1\text{-}I_{30}$ 条件下, 二者 SOC 流失量差异显著 ($p < 0.1$), $H_1\text{-}I_{60}$ 这场降雨后, 差异也达到显著水平 ($p < 0.001$).

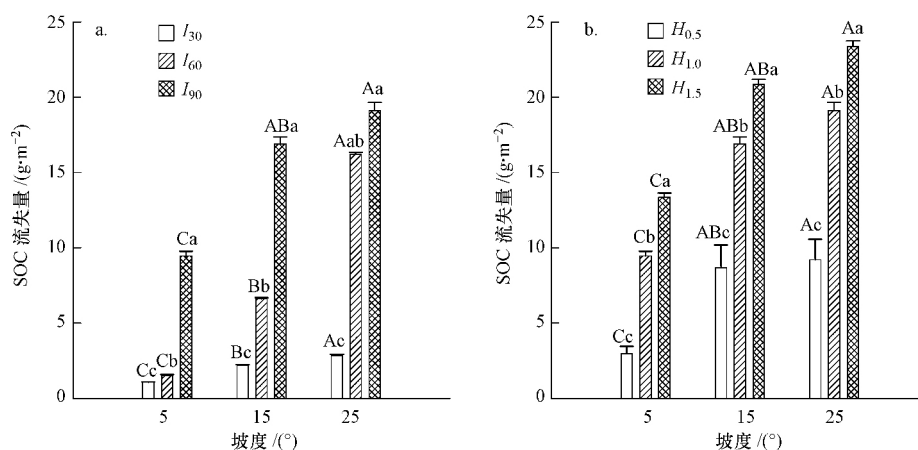


图 1 侵蚀条件下坡度、雨强和历时对 SOC 流失量的影响 (图中不同小写字母代表同坡度和历时下不同雨强间及同坡度和雨强下不同历时长 SOC 流失量存在显著差异 ($p < 0.1$), 不同大写字母代表同历时和雨强下不同坡度间存在显著差异 ($p < 0.1$), 否则无显著差异)

Fig. 1 Effect of slope, rainfall intensity and rainfall duration on soil organic carbon loss under the condition of soil erosion

同坡度和历时 (H_1 , 下同) 下, 随雨强的增加, SOC 流失量显著上升 (图 1a). 相较于 I_{30} 雨强下 5°、15°、25° 坡度的 SOC 流失量, I_{60} 、 I_{90} 雨强下对应坡度

的 SOC 流失量分别增加 41.8%、201.1%、475.1% 和 786.1%、671.2%、577.4%, 差异显著 ($p < 0.001$), I_{90} 较 I_{60} 雨强下对应坡度的 SOC 流失量分别增

加了 525.0%、156.1%、17.8%，差异也达到显著水平($p < 0.001$)。

同坡度和雨强(I_{90} ，下同)下，随历时的增加，SOC 流失量显著增加(图 1b)。与 $H_{0.5}$ 历时下 5°、15°、25° 坡度的 SOC 流失量相比， H_1 、 $H_{1.5}$ 历时下对应坡度 SOC 流失量显著增加($p < 0.001$)，增幅分别达 220.8%、94.9%、107.7% 和 353.4%、140.6%、153.9%。相较 H_1 历时下的 SOC 流失量， $H_{1.5}$ 历时下对应坡度的 SOC 流失量分别增加了 41.4%、23.4%、22.3%，差异也达显著性水平($p < 0.1$)。

3.2 坡度对土壤 CO₂ 通量、温度、水分的影响

同历时和雨强下，土壤 CO₂ 通量均呈现 5° > 15° > 25° 的趋势(表 1)，坡度对土壤 CO₂ 通量的影响达到显著性水平($p < 0.001$)。 H_1-I_{30} 和 H_1-I_{60} 这两场降雨，3 个坡度之间土壤 CO₂ 通量差异均未达到显著性水平。 H_1-I_{90} 这场降雨后，25° 与 5° 之间土壤 CO₂ 通

量差异显著($p < 0.1$)，下降达 23.3%，而 $H_{0.5}-I_{90}$ 、 $H_{1.5}-I_{90}$ 两场降雨后，25° 坡度下土壤 CO₂ 通量与 15° 相比分别降低了 18.1%、27.1%，差异达到显著性水平($p < 0.1$)，相较 5° 下的土壤 CO₂ 通量，表现为显著下降($p < 0.001$)，下降幅度分别为 25.7%、36.0%。

同历时和雨强下，随坡度的增加，土壤温度和水分没有显著变化。各坡度下的土壤温度呈现 5° > 15° > 25° 的趋势(表 1)，3 个坡度之间土壤温度差异较小(1.3% ~ 10.0%)，均未达到显著性水平。而坡度与土壤水分的关系相对比较复杂(表 1)，例如，降雨 $H_{0.5}-I_{90}$ 时，各坡度的土壤水分表现为 15° > 5° > 25°；降雨 H_1-I_{90} 后，则呈现出 15° > 25° > 5° 的趋势；而 $H_{1.5}-I_{90}$ 这场降雨后，土壤水分则随着坡度的增加而增加(25° > 15° > 5°)，但差异未达到显著性水平。

表 1 同历时和雨强下坡度对土壤 CO₂ 通量、温度、水分的影响

Table 1 Effect of gradient on soil CO₂ flux, soil temperature and soil moisture under the same rainfall duration and rainfall intensity

历时-雨强	坡度/(°)	土壤 CO ₂ 通量/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	土壤温度/°C	土壤水分(WFPS)
H_1-I_{30}	5	2.17 ± 0.77 ^A	26.19 ± 1.57 ^A	42.43% ± 5.00% ^A
	15	2.00 ± 0.64 ^A	25.43 ± 1.27 ^A	43.58% ± 4.47% ^A
	25	1.73 ± 0.64 ^A	24.52 ± 1.23 ^A	43.76% ± 4.23% ^A
H_1-I_{60}	5	1.22 ± 0.24 ^A	18.62 ± 0.97 ^A	49.96% ± 2.79% ^A
	15	1.15 ± 0.25 ^A	18.37 ± 0.90 ^A	53.62% ± 2.05% ^A
	25	1.02 ± 0.19 ^A	18.31 ± 0.89 ^A	56.96% ± 2.47% ^A
H_1-I_{90}	5	2.75 ± 0.55 ^A	30.91 ± 2.84 ^A	33.79% ± 4.65% ^A
	15	2.50 ± 0.66 ^{AB}	29.71 ± 2.35 ^A	35.77% ± 4.03% ^A
	25	2.11 ± 0.70 ^B	28.92 ± 2.05 ^A	34.81% ± 3.96% ^A
$H_{0.5}-I_{90}$	5	2.13 ± 0.44 ^A	30.68 ± 2.39 ^A	25.31% ± 7.94% ^A
	15	1.93 ± 0.33 ^A	29.10 ± 2.37 ^A	25.34% ± 8.26% ^A
	25	1.58 ± 0.26 ^B	27.61 ± 1.79 ^A	24.48% ± 8.65% ^A
$H_{1.5}-I_{90}$	5	1.97 ± 0.49 ^A	22.97 ± 1.51 ^A	41.48% ± 2.10% ^B
	15	1.73 ± 0.34 ^A	22.41 ± 1.05 ^A	46.04% ± 1.39% ^{AB}
	25	1.26 ± 0.12 ^B	21.51 ± 0.96 ^A	52.18% ± 2.84% ^A

注: 表中不同大写字母分别表示同历时和雨强下,不同坡度下土壤 CO₂ 通量之间、土壤温度之间、土壤水分之间有显著差异($p < 0.1$)，否则无显著差异。

3.3 降雨强度和历时对土壤 CO₂ 通量的影响

同坡度和历时(H_1)下，各降雨强度下的土壤 CO₂ 通量呈现出 $I_{30} > I_{60} > I_{90}$ 的趋势(图 2a)，同坡度和雨强(I_{90})下，各降雨历时下的土壤 CO₂ 通量则表现为 $H_{0.5} > H_1 > H_{1.5}$ 的趋势(图 2b)。

同坡度和历时下，随雨强的增加，土壤 CO₂ 通量呈现下降的趋势(图 2a)。相较 I_{30} 雨强下 5°、15°、25° 坡度的土壤 CO₂ 通量， I_{60} 、 I_{90} 雨强下对应坡度的土壤 CO₂ 通量分别降低了 2.3%、4.7%、7.7% 和 7.

3%、9.2%、14.3%，但差异均未达到显著性水平。

同坡度和雨强下，随历时的增加，土壤 CO₂ 通量也表现为降低的趋势(图 2b)。 H_1 、 $H_{1.5}$ 历时下 5°、15°、25° 坡度的土壤 CO₂ 通量与 $H_{0.5}$ 对应坡度相比，分别下降了 1.7%、4.0%、7.7% 和 3.4%、6.1%、20.9%。其中，历时 $H_{1.5}$ 下，25° 坡度的土壤 CO₂ 通量出现最小值 1.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，相较 $H_{0.5}$ 下 25° 坡度的土壤 CO₂ 通量差异显著($p < 0.1$)。

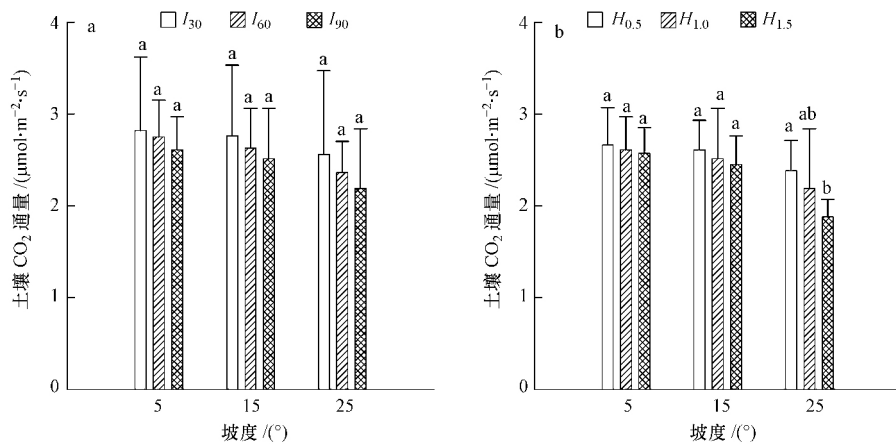


图2 侵蚀条件下雨强和历时对土壤 CO₂ 通量的影响(图中不同小写字母代表同坡度和历时下不同雨强间, 以及同坡度和雨强下不同历时长土壤 CO₂ 通量存在显著差异($p < 0.1$), 否则无显著差异)

Fig. 2 Effect of rainfall intensity and rainfall duration on soil CO₂ flux under the condition of soil erosion

4 讨论(Discussion)

4.1 坡度和降雨对土壤 CO₂ 通量的影响

侵蚀的强弱影响土壤 CO₂ 通量的变化. 本研究中, 随着坡度、雨强及历时的增加, 侵蚀的加剧, 土壤 CO₂ 通量降低(表 1、图 2). 不少研究也得到了类似的结果, 例如, 裴会敏等(2012) 研究发现, 与未侵蚀土壤相比较, 在表土剥离 5 cm 后, 高肥力土壤的土壤 CO₂ 通量降低了 32.0%; 李小宇等(2015) 也发现, 与坡中部轻度侵蚀区相比, 坡上部严重侵蚀区土壤 CO₂ 通量降低 5.3%. 其次植被覆盖度的差异可能通过影响 SOC 的输入量(凋落物、根系) 等影响 CO₂ 通量的升降(Parkin *et al.*, 2005; 郭晋伟, 2009). Parkin 等(2005) 研究发现, 处在生长季的玉米其根系呼吸在整个 CO₂ 通量系统中起到主导作用, 弥补了由于侵蚀造成的 CO₂ 通量的降低, 使得不同坡位之间 CO₂ 通量并没有出现显著的差异. 此外, 不同侵蚀条件下土壤的微环境(温度、水分) 也可能被影响(Bajracharya *et al.*, 2000), 从而引起 CO₂ 通量的不同变化. Bajracharya 等(2000) 指出, 虽然严重侵蚀区的坡度更大、植被覆盖度更低, 侵蚀相对严重, 但其土壤温度在夏季要显著高于轻度侵蚀区, 造成了土壤 CO₂ 通量的增加. 因此, 地形(坡度和坡长)、降雨(历时和雨强)、植被类型等差异, 都可能造成侵蚀对土壤 CO₂ 通量产生不同影响(Römkens *et al.*, 2002; Thorne *et al.*, 2005).

4.2 坡面 SOC 流失对土壤 CO₂ 通量的影响

本研究显示, 伴随坡度、雨强及历时的增加, 泥

沙量显著增加, 呈现大坡度大于小坡度、大雨强大于小雨强及长历时大于短历时的趋势(表 2), 类似的结果在其它研究中也有报道(和继军等, 2012; Bremenfeld *et al.*, 2013; Ziadat *et al.*, 2013). 雨强加大, 雨滴击溅作用更加强烈, 使得土壤颗粒分散程度加剧, 更易被水流搬运迁移(聂小东等, 2013), 同时, 径流冲刷能力也随着坡度的上升而加强(Ziadat *et al.*, 2013), 伴随历时的延长径流量也明显增加(Zhao *et al.*, 2015), 这都使得 SOC 流失量显著增加. SOC 是土壤微生物重要底物, 其含量与土壤 CO₂ 通量有显著的正相关关系(Sørensen *et al.*, 2005; 高宇等, 2013). 本研究中, 同历时的 3 场降雨土壤 CO₂ 通量和 SOC 流失量呈现较好的线性负相关关系($y = -0.0252x + 2.7958, R^2 = 0.77, r = -0.88, p < 0.1$) (图 3a), 同雨强的 3 场降雨下, 二者也呈现较好的线性负相关关系($y = -0.0341x + 2.8624, R^2 = 0.69, r = -0.83, p = 0.1$) (图 3b). 本研究排除了凋落物、根系、土壤动物的干扰, 不同侵蚀条件下土壤 CO₂ 通量的差异, 主要是由于微生物呼吸造成的, 而 SOC 作为呼吸基质对微生物呼吸强度有重要的控制作用(薛蕙等, 2007; 裴会敏等, 2012). 本研究中, 侵蚀以泥沙为载体, 通过剥蚀、搬运带走富含 SOC 的细颗粒物质, 减少了微生物呼吸的底物, 影响土壤 CO₂ 通量的变化, 不同侵蚀强度下 SOC 流失量的显著差异, 造成了土壤 CO₂ 通量的不同变化. 然而, 不少研究也指出, 不同程度侵蚀也可能通过改变土壤的通气状况(谢锦升, 2005)、底物的组成及有效性(Miller *et al.*, 2005)、微生物量及

活性(方华军等, 2006) 来影响土壤 CO₂ 通量的变化. 而本研究中, 主要分析了不同坡度、雨强及历时下 SOC 流失量的显著差异, 而对于原位土壤的通气状况、底物组成及微生物活性等对土壤 CO₂ 通量的影响需要进一步探讨.

表 2 坡度和降雨对泥沙量的影响

Table 2 Effect of slope and rainfall on the content of sediment

历时-雨强	不同坡度下的泥沙量/g		
	5°	15°	25°
H_1-I_{30}	52.8 ± 1.1 ^{Cc}	111.6 ± 2.1 ^{ABc}	120.3 ± 4.2 ^{Ac}
H_1-I_{60}	66.8 ± 4.6 ^{Cb}	274.5 ± 7.7 ^{Bb}	779.0 ± 28.6 ^{Ab}
H_1-I_{90}	467.4 ± 15.4 ^{Cae}	1041.1 ± 28.8 ^{ABae}	1161.2 ± 32.5 ^{Aae}
$H_{0.5}-I_{90}$	135.9 ± 12.3 ^{Cf}	412.5 ± 40.7 ^{ABf}	473.7 ± 41.0 ^{Af}
$H_{1.5}-I_{90}$	684.9 ± 13.9 ^{Cd}	1330.1 ± 20.1 ^{ABd}	1459.4 ± 23.0 ^{Ad}

注: 表中不同大写字母代表同历时和雨强下, 不同坡度间泥沙量存在显著差异($p < 0.1$), 否则无显著差异; 图中不同小写字母 a、b、c 代表同坡度和历时下, 不同雨强间存在显著差异($p < 0.1$), 不同小写字母 d、e、f 代表同坡度和雨强下, 不同历时时间存在显著差异($p < 0.1$), 否则无显著差异.

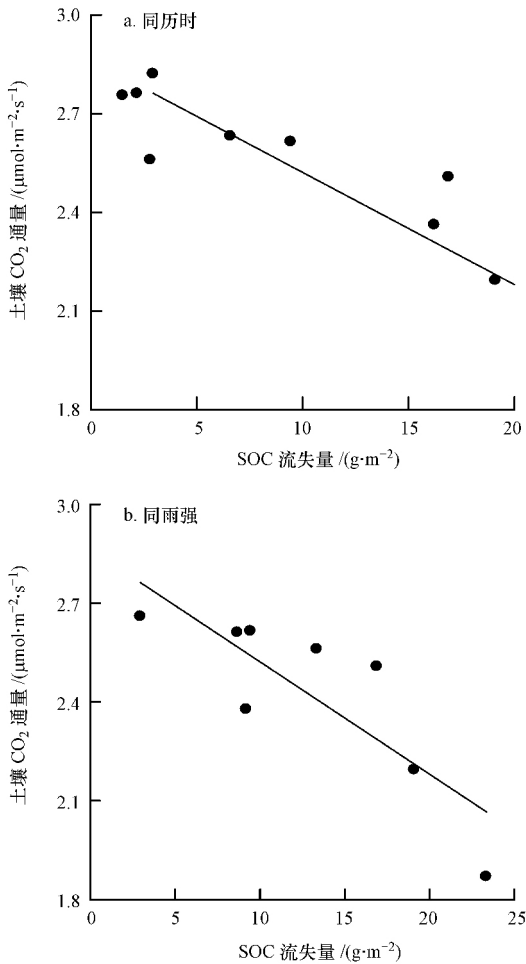


图 3 土壤 CO₂ 通量与 SOC 流失量的关系

Fig. 3 Relationship between soil CO₂ flux and the content of SOC loss

5 结论(Conclusions)

1) 同历时和雨强下, 各坡度下的土壤 CO₂ 通量均呈现出 5° > 15° > 25° 的趋势, 坡度对土壤 CO₂ 通量的影响达到显著性水平($p < 0.001$); 而土壤温度、土壤水分在不同坡度之间差异不明显.

2) 同坡度和历时下, 随雨强的增加, 土壤 CO₂ 通量呈现出 $I_{30} > I_{60} > I_{90}$ 的趋势, 同坡度和雨强下, 随历时的增加, 土壤 CO₂ 通量表现为 $H_{0.5} > H_1 > H_{1.5}$ 的趋势, 且历时对土壤 CO₂ 通量的影响达到显著性水平($p < 0.1$).

3) SOC 流失量随坡度、雨强及历时的增加而增加($p < 0.001$), 土壤 CO₂ 通量的变化与 SOC 流失量呈线性负相关关系($R^2 = 0.69 \sim 0.77, r = -0.83 \sim -0.88, p \leq 0.1$).

责任作者简介: 郭胜利(1969—), 男, 中国科学院水土保持研究所研究员, 博士生导师, 长期从事干旱区土壤碳氮循环及其调控机理研究. 先后获得国家自然科学基金(面上项目)、中组部与科学院“西部之光”人才培养计划等项目资助, 发表论文 50 多篇, SCI 收录 15 篇.

参考文献(References):

Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. 2000. Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio alfisol [J]. Soil Science Society of America Journal, 64(2): 694-700

Bremenfeld S, Fiener P, Govers G. 2013. Effects of interrill erosion, soil crusting and soil aggregate breakdown on in situ CO₂ effluxes [J]. Catena, 104: 14-20

方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 2006. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性 [J]. 水土保持学报, 20(2): 59-63

高宇, 樊军, 米美霞, 等. 2013. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸影响因素及其对土地利用方式变化的响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 19(5): 1207-1217

Grace J, Rayment M. 2000. Respiration in the balance [J]. Nature, 404(6780): 819-820

Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, et al. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects [J]. Soil & Tillage Research, 47(3/4): 291-302

郭晋伟. 2009. 黄土丘陵沟壑区坡地土壤呼吸时空变异特征 [D]. 西安: 西安建筑科技大学. 31-32

和继军, 蔡强国, 刘松波. 2012. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响 [J]. 应用生态学报, 23(5): 1263-1268

Iqbal J, Hu R, Feng M, et al. 2010. Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: a case study at Three Gorges Reservoir Area, South China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 137(3): 294-307

Jacinthe P A, Lal R, Owens L B, et al. 2004. Transport of labile carbon in

- runoff as affected by land use and rainfall characteristics [J]. Soil & Tillage Research, 77(2): 111-123
- 贾松伟. 2009. 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, 16(2): 30-33
- Lal R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 29(4): 437-450
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 304(5677): 1623-1627
- 李小宇, 李勇, 于寒青, 等. 2015. 退耕还林坡地土壤 CO₂ 排放的空间变化: 地形的控制作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 21(5): 1217-1224
- Miller A E, Schimel J P, Meixner T. 2005. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 37(12): 2195-2204
- Mora J L, Guerra J A, Armas C M, et al. 2007. Mineralization rate of eroded organic C in Andosols of the Canary Islands [J]. Science of the Total Environment, 378(1): 143-146
- 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 2013. 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, 50(5): 900-908
- Nie X J, Zhang J H, Su Z A. 2013. Dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in relation to water erosion and tillage erosion [J]. Plos One, 8(5): e64059
- Parkin T B, Kaspar T C, Senwo Z, et al. 2005. Relationship of soil respiration to crop and landscape in the walnut creek watershed [J]. Journal of Hydrometeorology, 6(6): 812-824
- 裴会敏, 许明祥, 脱登峰. 2012. 黄土丘陵区坡地侵蚀对土壤呼吸的影响 [J]. 水土保持通报, 32(4): 1-4; 15
- Römkens M J, Helming K, Prasad S. 2002. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes [J]. Catena, 46: 103-123
- Raich J W, Potter C S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 9(1): 23-36
- Søe A R, Buchmann N. 2005. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest [J]. Tree Physiology, 25(11): 1427-1436
- Schlesinger W H, Andrews J A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 48(1): 7-20
- Singh J, Gupta S. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. The Botanical Review, 43(4): 449-528
- Thorne M S, Trlica M J, Leininger W C, et al. 2005. Soil CO₂ efflux responses to soil loss on two rangeland ecosystems [J]. Rangeland Ecology & Management, 58(1): 27-34
- 谢锦升. 2005. 植被恢复对退化红壤易变碳及土壤呼吸的影响 [J]. 北京: 北京林业大学. 3-4
- 薛莲, 刘国彬, 戴全厚, 等. 2007. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响 [J]. 自然资源学报, 22(1): 20-27
- 严俊霞, 李洪建, 尤龙凤. 2010. 玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究 [J]. 干旱区资源与环境, 24(3): 183-189
- Zhang J H, Wang Y, Li F C. 2015. Soil organic carbon and nitrogen losses due to soil erosion and cropping in a sloping terrace landscape [J]. Soil Research, 53(1): 87-96
- Zhao Q, Li D, Zhuo M, et al. 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 29(2): 609-621
- 郑粉莉, 赵军. 2004. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介 [J]. 水土保持研究, 11(4): 177-178
- 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 2000. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置 [J]. 水土保持通报, 20(4): 27-30; 45
- Ziadat F, Taimeh A. 2013. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment [J]. Land Degradation & Development, 24(6): 582-590