

# 黄土丘陵区侵蚀坡面 CO<sub>2</sub> 通量空间分异格局驱动机制

郝旺林<sup>1,2,3</sup>, 夏彬<sup>1,2</sup>, 许明祥<sup>1,2,4\*</sup> (1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100190; 3.吕梁学院生命科学系, 山西 吕梁 033000; 4.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以黄土丘陵区不同有机碳水平的完整侵蚀坡面为对象, 解析了 CO<sub>2</sub> 通量的空间分异格局驱动因子及过程机制, 并构建了 CO<sub>2</sub> 通量的分段测算模型。结果表明: (1) 侵蚀导致坡面土壤 CO<sub>2</sub> 通量的空间分异格局, 具体表现为沉积区(S) > 对照区(CK) > 侵蚀区(E); 有机碳水平的提高可以整体促进各部位 CO<sub>2</sub> 通量的增加。 (2) 侵蚀可导致土壤水分、容重和团聚体稳定性降低, 引起土壤养分流失, 降低细菌、真菌多样性; 沉积则引起相反的现象。侵蚀/沉积过程对土壤温度的影响并不显著。有机碳水平的提高可以有效改善土壤颗粒、土壤水分, 增加容重, 抑制土壤养分的流失, 增加细菌, 降低真菌多样性。 (3) 结构方程模型解析了侵蚀部位、土壤温度、土壤水分、有机碳(SOC)、水溶性碳(DOC)、微生物碳(SMBC)、真菌多样性、细菌多样性对于 CO<sub>2</sub> 通量的多因素耦合驱动机制( $R^2=77%$ ), 明确了土壤温度、土壤水分、微生物碳为 CO<sub>2</sub> 通量的直接影响因子。在水热双因子模型的基础上, 嵌入能够间接表征微生物活性和有效碳底物的 C 因子, 分段(按照坡面侵蚀部位)建立 T&M&C 模型, 可以较为准确地测算侵蚀坡面不同部位 CO<sub>2</sub> 通量( $R^2>67%$ )。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 通量; 侵蚀坡面; 有机碳水平; 结构方程模型; 驱动机制

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)12-5875-10

**Driving mechanism of spatial differentiation patterns of CO<sub>2</sub> flux on eroded slope in loess hilly region.** HAO Wang-lin<sup>1,2,3</sup>, XIA Bin<sup>1,2</sup>, XU Ming-xiang<sup>1,2,4\*</sup> (1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Department of Life Sciences, LüLiang University, Lüliang 033000, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China). *China Environmental Science*, 2021,41(12): 5875~5884

**Abstract:** On eroded slopes with different soil organic carbon (SOC) levels in loess hilly region, the spatial differentiation patterns driving factors and process mechanisms of CO<sub>2</sub> fluxes were analyzed, and a subsection model of CO<sub>2</sub> fluxes was constructed. The results showed that: (1) The spatial differentiation patterns of soil CO<sub>2</sub> flux on slopes caused by erosion was as follows: sedimentary area (S) > control area (CK) > eroded area (E); the increase of SOC level can promote the increase of CO<sub>2</sub> flux in all parts of slope. (2) The erosion reduced soil moisture, bulk density and aggregate stability, cause soil nutrient loss, reduce bacteria diversity and fungal diversity; sedimentation caused the opposite phenomenon. The effect of erosion/sedimentation process on soil temperature was not significant. The increase of SOC level can effectively improve soil particles, soil moisture, increase bulk density, inhibit soil nutrient loss, increase bacteria diversity but reduce fungal diversity. (3) Our structural equation model analyzed the multi-factor driving mechanism of erosion location, soil temperature, soil moisture, SOC, DOC, SMBC, fungal diversity and bacterial diversity on CO<sub>2</sub> flux ( $R^2=77%$ ). Our model also identified soil temperature, soil moisture and SMBC as the direct influencing factors of CO<sub>2</sub> flux. Based on the two-factors hydrothermal model, the T&M&C model was built by embedding the C factor which could indirectly represent the microbial activity and available carbon substrate, thus allowing to estimate more accurately the CO<sub>2</sub> flux in different parts of the erosion slope ( $R^2>67%$ ).

**Key words:** CO<sub>2</sub> flux; eroded slope; SOC level; structural equation model; driving mechanism

土壤是陆地表层最大的碳储库, 有机碳储量可达到  $1.5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^3 \text{ Pg}^{[1]}$ 。土壤 CO<sub>2</sub> 排放效应及其影响因素不仅是关系全球气候变化的重大科学问题, 同时还影响人们对全球气候变化的预测能力<sup>[2-4]</sup>。因此, 在全球碳循环的系统格局中, 土壤有机碳库动态以及土壤 CO<sub>2</sub> 产生与排放过程已经成为全球碳循环研究和关注的重要课题<sup>[5]</sup>。

土壤侵蚀是土壤在外营力作用下, 被剥蚀、破坏、分离、搬运和沉积的过程, 它是陆地生态系统中

重要的自然地质现象与普遍存在的土壤退化形式<sup>[6]</sup>。作为土壤碳库动态的重要驱动因素, 土壤侵蚀不仅导致有机碳迁移及形态转化, 同时还造成土壤理化及生物学属性、水热环境等发生变化, 引起陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 通量改变, 是诱发陆地生态系统碳循环改

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771318, 41830758); 山西省高等学校科技创新项目(2020L0680); 吕梁市重点研发项目(2020SHFZ45)

\* 责任作者, 研究员, xumx@nwsuaf.edu.cn

变的重要驱动力<sup>[7-9]</sup>。近年来,已有不少学者就侵蚀诱发土壤碳流失及对土壤碳循环的影响展开相关研究,内容涉及侵蚀影响下土壤有机碳随径流及土壤物质迁移与再分布、有机碳流失规律<sup>[10-11]</sup>、侵蚀对土壤有机碳组分及稳定性的影响<sup>[12-13]</sup>、侵蚀对土壤碳平衡的影响、侵蚀诱发土壤碳的源汇效应等方面<sup>[14-19]</sup>。研究证实侵蚀引起土壤碳循环和 CO<sub>2</sub> 排放的强烈变化,显著影响土壤有机碳动态。

黄土高原土壤侵蚀面积达 39.08 万 km<sup>2</sup>,其中水蚀面积 33.41 万 km<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。目前,黄土高原土壤侵蚀对土壤碳损失的影响已有一些研究报道<sup>[21-23]</sup>,但这些研究主要关注侵蚀对坡面有机碳流失的影响,关于侵蚀对土壤 CO<sub>2</sub> 排放效应及多因子耦合作用机理的研究报道相对较少<sup>[24-25]</sup>,尚不能从过程和机理上科学认识侵蚀坡面土壤有机碳矿化动态与土壤碳排放效应。

本研究基于黄土丘陵区不同有机碳水平的完整侵蚀坡面,研究不同有机碳水平下侵蚀对土壤理化及生物属性、土壤环境、碳组分及 CO<sub>2</sub> 排放的影响方式、程度,揭示侵蚀诱发土壤 CO<sub>2</sub> 排放的多因素耦合作用机理,确立坡面尺度下水力侵蚀诱发 CO<sub>2</sub> 排放测算模型,以期对侵蚀影响下生态系统碳排放评估提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

表 1 试验区土壤理化性质概况

Table 1 Soil physical and chemical properties in experimental area

处理	容重 (g/cm)	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	pH 值
C1	1.27	3.03	0.32	0.55	8.63
C2	1.23	6.82	0.43	0.55	8.61
C3	1.12	10.33	0.52	0.57	8.59

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°11'~109°26'E,36°30'~37°19'N)山地试验场。该区域为典型的黄土丘陵沟壑区,属暖温带半干旱季风气候,平均海拔 1200m,相对高差 100~300m,年均气温 8.8℃,多年平均降水量 505mm,其中 7~9 月份的降水量占全年降水的 60%以上。该区土壤侵蚀以细沟、浅沟侵蚀为主,地带性土壤(黑垆土)已侵蚀殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥

形土)为主,土壤基本理化性质状况见表 1。

### 1.2 试验设计

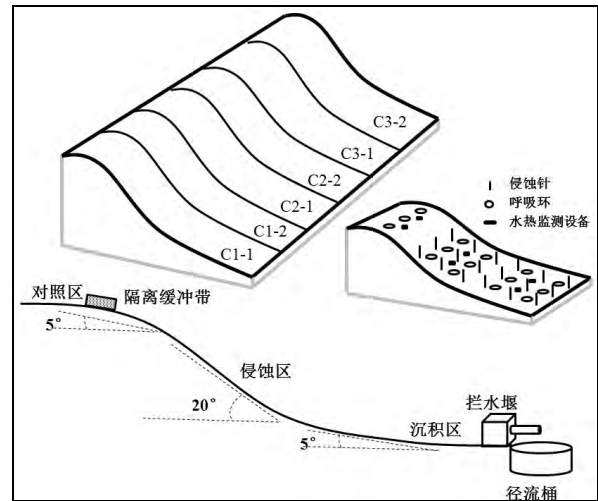


图 1 试验小区示意

Fig.1 Schematic diagram of test plot

C1~C3 表示 3 个有机碳水平,C1-1 表示 C1 水平重复 1,C1-2 表示 C1 水平重复 2

表 2 不同有机碳水平下坡面土壤侵蚀强度

Table 2 Soil erosion intensity on the slope for different SOC levels

有机碳水平	侵蚀部位	侵蚀厚度(mm/a)	侵蚀模数[m <sup>3</sup> /(km <sup>2</sup> ·a)]
C1	E	-62.65±2.01	-6265±201
	S	29.64±1.69	2964±169
C2	E	-61.30±2.33	-6130±233
	S	30.64±1.72	3064±172
C3	E	-56.70±3.25	-5670±325
	S	34.08±2.12	3408±212

注:E表示侵蚀区,S表示沉积区。

试验样地于 2011 年建成,样地小区为“S”型坡面,为了在坡面尺度上反映土壤侵蚀过程的侵蚀、沉积主要阶段,坡面上部平坦处、坡中、坡脚依次设置为对照区(非侵蚀区)(CK)、侵蚀区(E)和沉积区(S)。对照区地势平坦,接近 0°,并且在对照区和侵蚀区之间设置了隔离缓冲带,以保证对照区基本不会影响侵蚀区和沉积区,即沉积区和侵蚀区没有对照区的侵蚀积累;侵蚀区和沉积区又各分为上部和下部两个部位,代表不同的侵蚀和沉积深度。小区最下端设置拦水堰,汇聚坡面侵蚀泥沙形成沉积层。小区面积 2m×18m,坡向朝东,坡度 20°。小区在建成时通过施用腐熟的有机肥(羊粪),设置 3 个有机碳水平(C1~C3, 0~20cm 土壤背景有机碳含量分别为:C1 水平

3.03g/kg, C2 水平 6.82g/kg, C3 水平 10.33g/kg), 各有有机碳水平试验重复 2 次(例如: C1-1 表示 C1 水平重复 1, C1-2 表示 C1 水平重复 2)。试验过程中不定期除草, 保证小区为裸地状态。小区设计及试验布置见图 1, 各小区不同部位的侵蚀发生情况见表 2。

### 1.3 CO<sub>2</sub> 通量及土壤环境、理化、生物指标测定

分别在坡面对照区、侵蚀区(上、下)和沉积区(上、下)安装外径 20.5cm, 高 6cm 的 PVC 气室, 对照区、侵蚀区和沉积区上下部分别设置 3 个重复, 气室基座露出地面 1cm, 用于测定土壤 CO<sub>2</sub> 通量(图 1)。土壤 CO<sub>2</sub> 通量使用土壤碳通量自动测量系统(LI-8100A, Li-Cor Inc, USA)逐月监测, 同时配合使用土壤水分温度测定仪(WET-HH2, Delta-T Devices, UK)测量 0~5cm 的实时水分和温度, 监测时间从 2017 年 9 月延续至 2018 年 8 月。

各试验小区不同部位表层(0~5cm)处布设土壤温湿度监测系统(EM50, Decagon Inc, USA)进行全天候监测, 间隔为 0.5h, 用于长时间序列水热变化分析。

土壤样品采集: 在雨季前后, 利用直径 5cm 的土钻在各小区内按照不同部位采集 0~20cm 层次的土样, 每个处理 5 个重复。一部分采集后置于液氮中速冻低温保存用于高通量测序; 一部分土壤样品采集后置于装有冰袋保温袋中, 运回实验室后立即置于 4℃ 冰箱保存; 另一部分土壤样品采集后自然风干待测。

土壤样品处理: 土壤鲜样过 2mm 筛, 用于微生物量碳、水溶性碳测量; 其余土样风干磨细, 过 2, 1, 0.25mm 筛, 用于物理、化学指标测定。

土壤容重(BD, g/cm<sup>3</sup>)采用环刀法进行测定; 土壤全氮(TN, %)采用凯氏法消解, 凯氏定氮仪测定; 土壤全磷(TP, g/kg)采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解; 土壤有机碳(SOC, g/kg)重铬酸钾容量法进行测定; 土壤微生物量碳(SMBC, mg/kg)采用熏蒸提取—碳自动一起法测定; 土壤 pH 值: 水土质量比为 2.5:1, 采用 pH 计测定; 土壤水溶性碳(DOC, mg/kg)采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提, 总碳分析仪进行测定; 土壤团聚体采用改进的 Yoder 湿筛法进行测定; 微生物群落多样性采用高通量测序技术(16S-rRNA/ITS1)进行分析。

### 1.4 数据分析

采用 Origin2021 (Origin Lab, USA)绘图, 采用 SASV8.0 统计软件(SAS Institute Inc., Cary, NC,

USA)进行方差分析(ANOVA)及多重比较、非线性回归分析。

采用 AMOS 25Graphics 软件(IBM, SPSS, Armonk, NY, USA)构建结构方程模型(SEM), 量化驱动不同有机碳背景下坡面不同侵蚀部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量的直接和间接因素。通过分析自变量, 响应变量和经验知识之间的相关性建立基本模型, 根据实际模型拟合参数(包括卡方( $\chi^2$ )统计量, 整个模型 *P* 值, 拟合优度指数(GFI)和近似均方根误差(RMSEA))对基础模型进行优化。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机碳水平下坡面各部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量特征

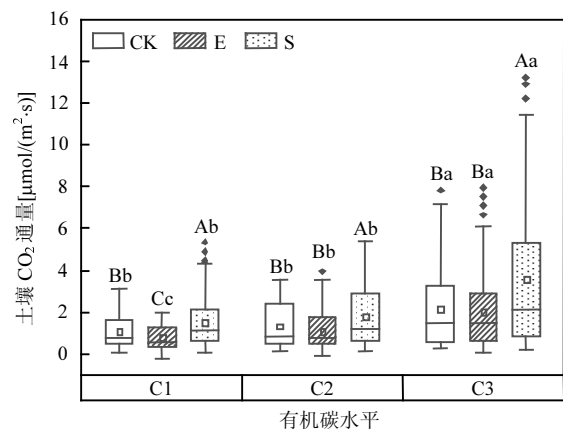


图 2 不同有机碳下侵蚀坡面各部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量特征及差异情况

Fig.2 Differences of soil respiration rate on various parts of slopes with different SOC levels

大写字母表示同一有机碳水平不同部位之间的差异( $P < 0.05$ ), 小写字母表示不同有机碳水平同一部位之间的差异( $P < 0.05$ ), 下同

如图 2 所示, 比对同一有机碳水平下侵蚀坡面不同部位, C1 水平下侵蚀坡面不同部位土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 通量差异显著( $P < 0.05$ ), C2、C3 水平下侵蚀区(E)与对照区(CK)CO<sub>2</sub> 通量差异不显著, 但与沉积区(S)存在明显差异, 各有机碳水平下 CO<sub>2</sub> 通量总体均表现为: 沉积区(S) > 对照区(CK) > 侵蚀区(E), 这表明侵蚀在某种程度上诱发了 CO<sub>2</sub> 通量的降低, 沉积增加了 CO<sub>2</sub> 的排放速率; 比对不同有机碳水平下侵蚀坡面相同部位, C3 水平与 C1、C2 水平相同部位均存在显著差异( $P < 0.05$ ), 这表明有机碳水平对侵蚀坡面

各部位 CO<sub>2</sub> 通量有显著影响.整体分析坡面不同部位 CO<sub>2</sub> 通量的变化情况,相比如对照区,C1、C2、C3 水平下侵蚀区 CO<sub>2</sub> 通量分别降低了 27.10%、17.29%、7.79%,沉积区 CO<sub>2</sub> 通量分别增加了 43.92%、36.09%、63.30%.

2.2 不同有机碳水平下坡面各部位土壤水热特征

综合分析有机碳水平及侵蚀坡面不同部位对温度差异的影响(图 3a),可以明确:同一有机碳水平下侵蚀坡面不同部位均无显著差异( $P < 0.05$ ),这表明侵蚀对土壤温度并未产生显著影响;而不同有机碳水平下侵蚀坡面同一部位则存在显著差异( $P < 0.05$ ),这也就表明有机碳水平会影响温度的变化及局部的差异性.

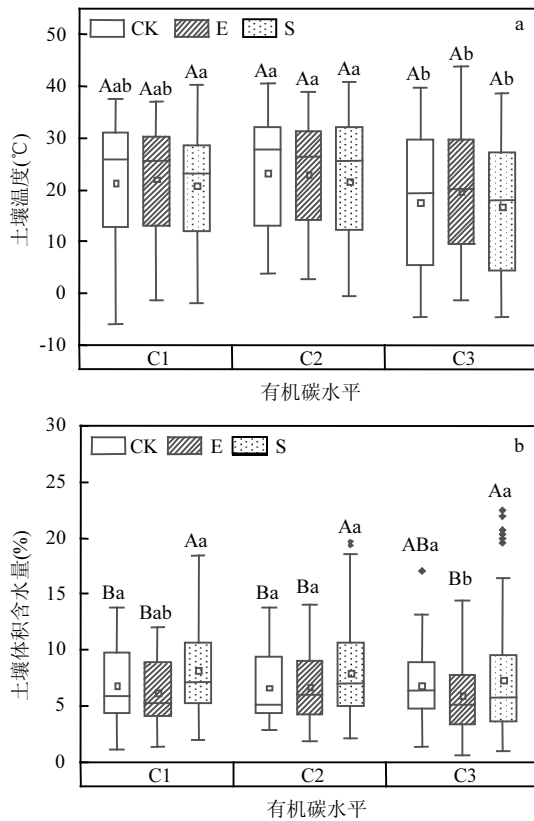


图3 不同有机碳下侵蚀坡面各部位土壤水热特征差异  
Fig.3 Differences of temperature and moisture on various parts of slopes with different SOC levels

土壤含水量除了与土壤本身属性有关,主要受降雨和地表蒸散有关.总体分析土壤水分差异(图 3b),就同一有机碳水平下侵蚀坡面不同部位而言,各有机碳水平下沉积区(S)水分与侵蚀区(E)、对照区(CK)差异显著( $P < 0.05$ ),总体表现为:沉积区(S) $>$ 对照区(CK) $>$ 侵蚀区(E),这表明侵蚀会导致土壤水分

的分布不均;就不同有机碳水平下侵蚀坡面同一部位而言,不同碳水平下侵蚀区(E)存在显著差异,而沉积区与对照区差异并不显著,有机碳水平对侵蚀区水分有较为明显的影响.

2.3 不同有机碳水平下坡面各部位土壤物理属性特征

在土壤容重变化方面(图 4a),同一有机碳水平下侵蚀坡面不同部位土壤容重均存在显著差异( $P < 0.05$ ),表现为:沉积区(S) $>$ 对照区(CK) $>$ 侵蚀区(E);不同有机碳水平下相同部位土壤容重亦存在显著差异( $P < 0.05$ ).在水稳性团聚体变化方面(图 4b),同一有机碳水平下侵蚀坡面不同部位土壤团聚体平均重量直径(NWD)均存在显著差异( $P < 0.05$ ),表现为:侵蚀区(E) $>$ 对照区(CK) $>$ 沉积区(S);不同有机碳水平下侵蚀坡面同一部位亦存在显著差异( $P < 0.05$ ),随着有机碳水平的增加土壤团聚体平均重量直径(NWD)呈增大趋势,这表明高有机碳水平增加了水稳性团聚体的稳定性.

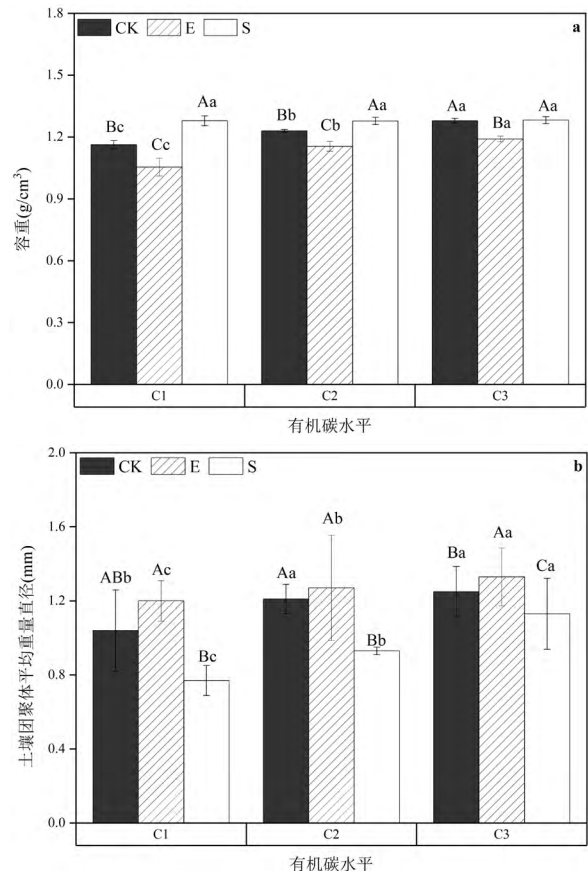


图4 不同有机碳下侵蚀坡面各部位土壤容重和水稳性团聚体差异

Fig.4 Differences of bulk density and water-stable aggregates on various parts of slopes with different SOC levels

2.4 不同有机碳水平下坡面各部位土壤化学属性特征

由表 3 可知,有机碳表现为:沉积区(S)>对照区(CK)>侵蚀区(E),侵蚀诱发有机碳的搬运,沉积引起有机碳的埋藏;由于土壤中碳氮高度耦合,因而全氮含量表现为:沉积区(S)>对照区(CK)>侵蚀区(E);全磷含量表现为:沉积区略高于对照区与

侵蚀区,有机碳水平的高低对全磷含量影响并不明显;沉积区 pH 值均低于侵蚀区和对照区,有机碳水平的不同可能会引起土壤 pH 值的变化;水溶性有机碳(DOC)和微生物碳(SMBC)含量均表现为:沉积区(S)>对照区(CK)>侵蚀区(E),随着有机碳水平的提高,水溶性碳和微生物碳均有不同程度的增加。

表 3 不同有机碳下侵蚀坡面各部位土壤化学属性  
Table 3 Soil chemical properties on various parts of slopes with different SOC levels

有机碳水平	侵蚀部位	TOC(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	pH 值	DOC(mg/kg)	SMBC(mg/kg)
C1	CK	2.94±0.21Bc	0.33±0.02Bc	0.54±0.01Ba	8.69±0.03Aa	81.17±14.26Bc	162.43±16.53Bc
	E	2.70±0.34Cc	0.32±0.02Cc	0.55±0.04Aa	8.63±0.02Bb	78.86±10.40Bc	157.75±13.60Bc
	S	3.59±0.32Ac	0.35±0.01Ac	0.55±0.01Aa	8.59±0.02Cb	94.27±4.97Ac	188.51±14.72Ac
C2	CK	4.68±0.10Bb	0.45±0.07Ab	0.55±0.00Ba	8.60±0.06Bc	85.54±3.54Bb	171.08±7.09Bb
	E	4.29±0.59Cb	0.42±0.10Bb	0.54±0.01Ca	8.64±0.04Aa	84.38±5.60Bb	168.79±6.40Bb
	S	5.49±0.49Ab	0.47±0.01Ab	0.57±0.00Aa	8.61±0.05Ba	98.30±11.19Ab	196.61±19.99Ab
C3	CK	6.51±0.62Ba	0.50±0.01Ba	0.54±0.01Ba	8.63±0.02Bb	116.19±6.19Ba	249.03±18.78Ba
	E	5.45±0.21Ca	0.47±0.02Ca	0.59±0.02Aa	8.64±0.01Aa	104.52±9.39Ca	232.38±12.39Ca
	S	7.81±0.42Aa	0.55±0.01Aa	0.59±0.00Aa	8.52±0.04Cc	140.52±19.69Aa	281.16±19.76Aa

注:大写字母表示同一有机碳水平不同部位之间的差异(P<0.05),小写字母表示不同有机碳水平同一部位之间的差异(P<0.05).

2.5 不同有机碳水平下坡面各部位土壤生物属性特征

高通量测序数据经过滤、质控后,对样本随机抽取的有效序列所对应的稀释曲线分析,细菌和真菌 Goods coverage 指数分别为 97%、99%,均在 97%~100%范围之内,这表明测序深度已经基本覆盖到样品中所有的物种深度,可用于后续分析.就细

菌分类而言,C3 和 C2 水平下的细菌 OTU 数均呈现沉积区最大、对照区(CK)最小的特征,C1 水平则表现为对照区(CK)>沉积区(S)>侵蚀区(E).除对照区外,侵蚀坡面各部位的细菌 OUT 数均随有机碳水平升高而增加.就真菌而言,则表现为:除沉积区外,OUT 数随有机碳水平升高而增加,但在同一有机碳水平下不同部位间数量并无明显规律.

表 4 不同有机碳下侵蚀坡面各部位细菌和真菌 Alpha 多样性指数

Table 4 Soil bacteria and fungi alpha diversity indices on various parts of slopes with different SOC levels

有机碳水平	侵蚀部位	细菌				真菌			
		OUT	Observed species 指数	Shannon 指数	Goods coverage 指数	OTU	Observed species 指数	Shannon 指数	Goods coverage 指数
C1	CK	32583	6553.46±356.71Aa	11.43±0.24Aa	0.97±0.00Aa	1547	309.76±24.31ABc	5.03±1.14Aa	0.99±0.00Aa
	E	32112	6477.30±442.46Aa	11.24±0.31Aa	0.97±0.00Aa	1351	271.40±45.29Bb	4.87±1.14Aa	0.99±0.00Aa
	S	32477	6501.64±531.13Ab	11.31±0.16Ab	0.97±0.00Ba	1769	354.62±46.69Aa	4.24±0.82Aa	0.99±0.00Aa
C2	CK	32951	6616.38±805.34Aa	11.48±0.23Aa	0.97±0.01Aa	1881	376.54±18.42Ab	4.75±0.67Aa	0.99±0.00Aa
	E	33375	6725.86±821.56Aa	11.51±0.20Aa	0.97±0.01Aa	1499	301.36±50.07Ab	3.32±1.31Aa	0.99±0.00Aa
	S	33468	6692.22±482.89Aab	11.47±0.11Aab	0.97±0.00Aa	1799	360.64±83.38Aa	3.50±1.01Aa	0.99±0.00Aa
C3	CK	31518	6334.34±298.66Ba	11.32±0.14Ba	0.97±0.00Aa	2169	433.84±54.47Aa	5.86±0.76Aa	0.99±0.00Aa
	E	34240	6900.74±499.93Aa	11.53±0.17Aa	0.97±0.00Aa	2220	446.14±42.71Aa	5.91±0.62Aa	0.99±0.00Aa
	S	35580	7131.22±213.20Ab	11.56±0.15Aa	0.96±0.00Aa	1727	346.52±66.98Ba	3.63±1.10Ba	0.99±0.00Aa

注:大写字母表示同一有机碳水平不同部位之间的差异(P<0.05),小写字母表示不同有机碳水平同一部位之间的差异(P<0.05).

结合 Alpha 多样性指数进行微生物群落多样性差异分析(表 4).细菌 Observed species 指数显示,沉

积区细菌群落丰富度较高,对照区相对较低;高有机碳水平细菌群落丰富度较高,低有机碳水平丰富度

较低;细菌 Shannon 指数显示,不同有机碳水平下侵蚀坡面各部位的细菌群落物种比例均匀.真菌 Observed species 指数显示,高有机碳水平下的对照区和侵蚀区真菌群落丰富度最高,中、低有机碳水平下的侵蚀区真菌群落都呈现较低的丰富度;真菌 Shannon 指数显示,不同有机碳水平下各侵蚀区和沉积区相比对照区物种均匀度稍低,有机碳水平对物种均匀度影响不显著.

2.6 侵蚀坡面不同部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量多因素驱动机制解析及估算模型构建

基于结构方程模型(SEM),构建有机碳背景-侵蚀-土壤属性与环境-土壤碳通量之间的驱动与耦合机制.选取相关变量(侵蚀部位、土壤温度、土壤水分、SOC、TN、TP、pH 值、DOC、SMBC、真菌多样性、细菌多样性、土壤容重、团聚体)整合到结构方程模型中,通过构建初始模型,检查模型,对预测变量进行参数化,最终获得最佳结构方程.模型变量(侵蚀部位、土壤温度、土壤水分、SOC、DOC、SMBC、真菌多样性、细菌多样性)解释了侵蚀坡面不同部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 77%的变化 (R<sup>2</sup>=77%)(图 5).

侵蚀部位通过影响土壤水环境、土壤生物属性、化学属性进而导致土壤 CO<sub>2</sub> 通量的差异(图 5).土壤温度、土壤水分、SMBC 对土壤 CO<sub>2</sub> 通量产生直接影响.土壤化学属性(SOC、DOC)、生物属性(真菌多样性、细菌多样性)则通过间接作用土壤温度、土壤水分、SMBC,进而对土壤 CO<sub>2</sub> 通量产生影响.土壤 CO<sub>2</sub> 通量对于土壤温度、土壤水分、SMBC 的直接反馈机制,可用于土壤 CO<sub>2</sub> 通量的精确量化预测.

根据结构方程模型解析的侵蚀坡面不同部位土壤 CO<sub>2</sub> 多因素驱动机制,提出分部位预测模型,基

础模型如下:

$$F = kf(Tem \cdot W \cdot C) \tag{1}$$

$$Tem = \text{Exp}(a \sum T_i / n) \tag{2}$$

$$W = (\sum \theta w_i / n)^b \tag{3}$$

$$C = \text{SOC}^m (\text{SMBC} / \text{SOC}) \tag{4}$$

式中:F 为 CO<sub>2</sub> 通量, μmol/(m<sup>2</sup>·s); Tem 为温度参数,W 为水分参数,C 为碳参数,T 为温度, °C; θw 为体积含水量, %; SOC 为有机碳含量, g/kg; SMBC 为微生物碳含量, mg/kg; n 为温度、水分、SCO、SMBC 实测数据样本量;k、a、b、m 为常数.

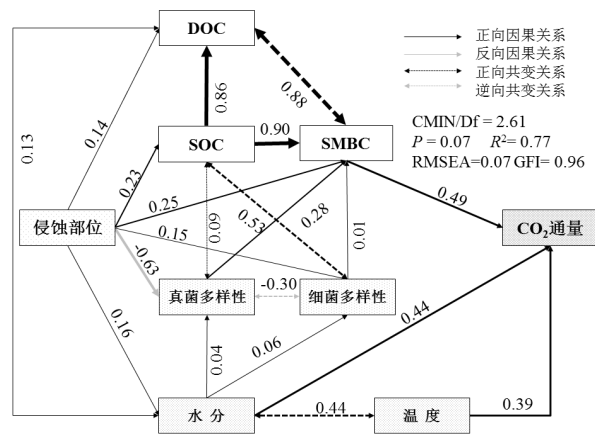


图 5 结构方程模型解析侵蚀坡面不同部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量多因素驱动机制

Fig.5 Multi-factor driving mechanism of soil CO<sub>2</sub> flux in different parts of erosion slope with SEM

基于小区定位监测获取所得 F、T、θw、SOC、SMBC 实时数据(n=144),结合基础模型,计算 k、a、b、m 等常数,并对模型适配性进行计算检验,3 个不同部位的模型拟合参数分别为 0.6720, 0.7443, 0.7131,对土壤 CO<sub>2</sub> 通量解释度较高,且均达到极显著水平,模型解释度较好(表 5).

表 5 坡面尺度土壤侵蚀碳排放模型构建

Table 5 Construction of carbon emission model for soil erosion at slope scale

部位	k	a	b	m	R <sup>2</sup>
CK	0.0176±0.0051	0.0373±0.0038	0.7623±0.0885	33.8844±3.0327	0.6720***
E	0.0050±0.0011	0.0422±0.0024	0.8656±0.0589	45.4037±2.6147	0.7443***
S	0.0065±0.0016	0.0504±0.0030	0.5662±0.0549	52.0737±2.6342	0.7131***

注:\*\*\*表示差异极显著(P<0.001).

3 讨论

3.1 侵蚀坡面系统土壤 CO<sub>2</sub> 排放效应

土壤侵蚀和沉积过程直接驱动生态系统有机碳的水平迁移,这个过程伴随着土壤的剥离、搬运、再分布和沉积<sup>[17]</sup>,这样不仅形成了有机碳分布新格

局,同样在有机碳搬运过程中,由于暴露在空气最前沿,不稳定的有机碳很容易被矿化,以 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等气体形式经过土气界面进入大气中<sup>[26]</sup>。侵蚀发生过程中,处于坡面侵蚀区的土壤表层将会被剥离、搬运,沿着坡面向下迁移,在地势较低的沉积区淤积成为沉积区亚表层土壤,而侵蚀区亚表层则迁移相对滞后,淤积成为沉积区的表层土壤,这种“倒置现象”将造成侵蚀区养分流失,导致土壤 CO<sub>2</sub> 通量降低,而沉积区则会造成有机碳的富集,但富集的有机碳由于土壤属性的骤变,短时期内无法形成稳定的沉积物,会加速矿化,进而导致沉积区 CO<sub>2</sub> 通量增加<sup>[27]</sup>。

本研究中坡面 CO<sub>2</sub> 通量总体均表现为:沉积区(S)>对照区(CK)>侵蚀区(E),坡面各部位由于侵蚀引发的“倒置现象”而形成了侵蚀区域 CO<sub>2</sub> 通量减小,沉积区域 CO<sub>2</sub> 通量增加的空间分异格局。Schlesinger<sup>[28]</sup>等研究结果也印证了这一点:土壤侵蚀剥除表土后,使表土与亚表土混合加剧,促进了土壤细颗粒向下移动,导致团聚体质量变差,土壤有机碳不能以稳定的形式沉积,导致土壤呼吸速率增加。同时,由于侵蚀区表面暴露而影响土壤环境和属性,进而影响土壤呼吸。李嵘等<sup>[29]</sup>也认为坡下部堆积区土壤呼吸速率显著高于坡顶部无侵蚀区和坡中部轻度侵蚀区。随着有机碳水平的增加(C1-C3),各部位 CO<sub>2</sub> 通量均呈增加趋势,这表明有机碳水平的增加,直接导致有效矿化底物的增加,进而导致 CO<sub>2</sub> 通量的增加<sup>[30]</sup>。

### 3.2 侵蚀坡面土壤环境及理化生物属性

在外营力的作用下,土壤表层将被破坏、搬运、迁移并进行再次分布,而这一系列过程,将直接导致表层土壤衰减<sup>[31]</sup>、水热环境发生剧变<sup>[24,32]</sup>、表层土壤养分流失加剧<sup>[33]</sup>、土壤属性发生定向和非定向变化<sup>[34]</sup>,进而引起土壤质量的退化。本研究中,侵蚀对土壤温度并未产生显著影响,但会导致各部位土壤水分的分布不均。这与文献[23,35]等研究结果基本一致,侵蚀区和沉积区的土壤温度差异并不显著,但沉积区较侵蚀区土壤水分显著提高。有机碳水平不仅显著影响侵蚀区和沉积区的土壤水分,而且会影响温度的变化及局部的差异性。这可能与有机碳的保水性能有关,随着有机碳水平的增加,土壤团粒结构增多、稳定性增强,土壤空隙分布均匀化,毛管数量增加,土壤吸水保水能力增加,水分的含量也会随之

增加<sup>[36-37]</sup>。而水分的变化可能会间接导致温度的空间局部差异。

在侵蚀作用下,土壤的孔隙结构和团聚体结构空间分布格局被重置,侵蚀剥离表层土壤致使侵蚀区容重降低,沉积区由于细颗粒的堆积、土壤结构的重构而导致容重增加<sup>[38]</sup>。整个侵蚀过程团聚体破坏,在沉积区堆积的团聚体稳定性减弱<sup>[39]</sup>。而有机碳水平的高低直接决定了土壤容重的格局和团聚体的稳定性。侵蚀破坏土壤物理属性的同时,伴随着养分的格局变化,侵蚀导致有机碳的减少,沉积增加了有机碳的含量;水溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(SMBC)分布变化与有机碳高度一致。由于碳氮高度耦合,侵蚀对全氮的影响和有机碳保持高度一致;而全磷含量受有机碳水平和侵蚀的影响并不明显;这与文献[40-42]结果一致:侵蚀对土壤颗粒破坏和搬运时,土壤中的营养物质会伴随着土壤颗粒的迁移而流失,也会随着泥沙沉积而埋藏。迁移、沉积的发生和有机碳水平的增加可能会引起土壤 pH 值的减少;这是由于土壤发生侵蚀后,土壤矿质养分损失会使土壤致酸离子的相对浓度增加,进而促使土壤 pH 值降低<sup>[43]</sup>。Qiu 等<sup>[44]</sup>认为土壤侵蚀对土壤微生物多样性和功能性具有重大的负面影响,相对于非侵蚀地块,侵蚀地块具有较低的微生物网络复杂性,较少的微生物类群和较少的微生物类群关联。而本研究则表明,在不同的侵蚀部位,细菌和真菌的丰富度表现出一定拮抗作用,沉积区细菌群落丰富度较高,而对照区和侵蚀区真菌群落丰富度较高。高有机碳水平可以有效提升微生物的多样性和丰度。这可能与侵蚀发生的部位、类型、时间有很大关系,并且不同的微生物类群对侵蚀的响应机制也不同。有机碳作为微生物生命活动过程的底物在很大程度上对微生物多样性和丰度产生正向效应。

### 3.3 侵蚀坡面 CO<sub>2</sub> 排放的多因素耦合作用机理

侵蚀发生过程中,土壤-大气界面 CO<sub>2</sub> 通量受多种复杂因素的影响,可根据影响 CO<sub>2</sub> 产生、封存、扩散、排放等过程分为生物与非生物因素<sup>[45-46]</sup>。本研究中,确立了侵蚀部位、土壤温度、土壤水分、SOC、DOC、SMBC、真菌多样性、细菌多样性对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的多因素影响机制(图 5)。侵蚀引起的土壤 CO<sub>2</sub> 通量分异特征归因于土壤环境、土壤属性的变化。侵蚀直接作用于土壤水分、SOC、DOC、SMBC、真

菌多样性、细菌多样性,对土壤温度和通量并没有直接显著效应.温度、水分、SMBC 最终被确立为影响 CO<sub>2</sub> 通量的直接因素,这与文献[47-48]关于温度、湿度、有机碳对 CO<sub>2</sub> 通量的结果一致.而本研究进一步强调了有机碳组分中 SMBC 对 CO<sub>2</sub> 通量的作用过程.水溶性碳(DOC)和微生物碳(SMBC)的变化受有机碳水平的强烈制约,DOC 是土壤有机碳中最活跃的组分,容易受到土壤水分的影响,它可以直接被微生物分解<sup>[49-50]</sup>,DOC 含量与 SMBC 有很强的共变关系,SMBC 又受细菌和真菌多样性的影响,这是由于侵蚀改变土壤微生物群落的生长环境,影响土壤微生物生长,微生物分解 DOC 的过程改变,进而引起 SMBC 的改变<sup>[51]</sup>,在某种程度上 SMBC 可以表征土壤微生物的活性.水分驱动了微生物的局部分布和多样性变化<sup>[52]</sup>,细菌和真菌之间存在逆向共变关系,也就表明在侵蚀影响土壤生物属性的过程当中,两种不同类别的微生物存在拮抗作用.有机碳水平与细菌多样性有强烈共变关系,对真菌影响并不显著.

Mande 等<sup>[48]</sup>研究认为土壤温度和水分解释了土壤 CO<sub>2</sub> 排放的同时,土壤有机碳的作用也不可忽略,它们同样强烈反馈土壤 CO<sub>2</sub> 的排放.而传统的经验-统计模型多集中在水、热单因素或者水热双因素模型,忽略了底物和其他环境要素的影响,在精确测算 CO<sub>2</sub> 通量方面有一定的缺陷.本研究中,结构方程模型最终确立了侵蚀引发 CO<sub>2</sub> 通量分异格局的直接驱动因素土壤温度、土壤水分、SMBC,在水热双因素模型的基础上,添加矿化底物要素,分段构建水、热、碳(T&M&C)三因子模型(解释度均在 67% 以上).Chen 等<sup>[53]</sup>在农田、草地和森林开发了一个 T&P&C 模型,将 SOC 作为年度土壤呼吸( $R_s$ )的额外预测因子,这个简单的扩展模型比 T&P 模型表现更好,建模效率在整个生态系统中接近 60%.这充分体现了水、热、碳三因素模型的优越性.SMBC 受土壤微生物直接作用,可以很好地体现土壤微生物的活性,这样可以通过有效量化微生物代谢过程,将土壤微生物属性变化间接嵌入 CO<sub>2</sub> 通量预测模型.C 因子选用 SMBC 添加到模型当中,而 SMBC 与总有机碳有明显的正向共变关系,这样就可以通过合理构建 SMBC 与总有机碳量化关系,将 C 因子最终以有机碳底物含量呈现,构建经济、实用、准确的预测模型.

## 4 结论

4.1 侵蚀导致坡面土壤 CO<sub>2</sub> 通量的空间分异格局,具体表现为:沉积区(S)>对照区(CK)>侵蚀区(E);侵蚀过程引起 CO<sub>2</sub> 通量的降低,而沉积过程造成了 CO<sub>2</sub> 通量的增加.有机碳水平的提高,可以整体促进各部位 CO<sub>2</sub> 通量的增加.

4.2 侵蚀可导致土壤水分、容重和团聚体稳定性降低,引起土壤养分流失、降低细菌、真菌多样性;沉积导致土壤颗粒的堆积、容重增加,土壤养分埋藏富集,有效增加了细菌多样性、降低了真菌多样性.而侵蚀/沉积过程对土壤温度的影响并不显著.有机碳水平的提高可以有效改善土壤颗粒、土壤水分,增加容重,抑制土壤养分的流失、增加微生物多样性.

4.3 结构方程模型解析了侵蚀部位、土壤温度、土壤水分、SOC、DOC、SMBC、真菌多样性、细菌多样性对于 CO<sub>2</sub> 通量的多因素耦合驱动机制( $R^2=77\%$ ),明确了土壤温度、土壤水分、SMBC 为 CO<sub>2</sub> 通量的直接影响因子.在水热双因子模型的基础上,嵌入能够间接表征微生物活性和有效碳底物的 C 因子,分段建立(按照坡面侵蚀部位)T&M&C 模型,可以较为准确地测算侵蚀坡面不同部位 CO<sub>2</sub> 通量.

## 参考文献:

- [1] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic-carbon in soils of the world [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(1):192-194.
- [2] 潘根兴,曹建华,周运超.土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义 [J]. 第四纪研究, 2000,20(4):325-334.  
Pan G X, Cao J H, Zhou Y C. Soil carbon and its significance in carbon cycling of earth surface system [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4):325-334.
- [3] 吴金水,童成立,刘守龙.亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应 [J]. 地球科学进展, 2004,19(1):131-137.  
Wu J S, Tong C L, Liu S L. Responses of soil organic carbon to global climate changes in cultivated soils in the subtropical and the loess plateau regions [J]. Advance in Earth Sciences, 2004,19(1):131-137.
- [4] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes [J]. Earth-Science Reviews, 2016,154:102-122.
- [5] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003,29(4):437-450.
- [6] 刘纪根,赵健,张平仓,等.基于 RS 和 GIS 的乌东德水电站坝址区土



- 壤侵蚀预测研究 [J]. 长江科学院院报, 2007,24(4):10-13.
- Liu J G, Zhao J, Zhang P C, et al. Soil erosion prediction in dam region of Wudongde Hydroelectric Power Station based on GIS and RS [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(4):10-13.
- [7] Lal R. Soil erosion and carbon dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2005,81(2):137-142.
- [8] Nadeu E, Berhe A A, Vente J, et al. Erosion, deposition and replacement of soil organic carbon in mediterranean catchments: a geomorphological, isotopic and land use change approach [J]. Biogeosciences, 2012,9(3):1099-1111.
- [9] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion [J]. Bioscience, 2007,57(4): 337-346.
- [10] 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 [J]. 水土保持学报, 2009,23(1):45-49.
- Zhang M K, Liu Z Y. Soil erosion-induced selective transfer of various forms of organic carbon in red soil slope field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(1):45-49.
- [11] Zhang X, Li Z W, Tang Z H, et al. Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China [J]. Geomorphology, 2013,197:137-144.
- [12] 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 [J]. 土壤学报, 2007,44(3):467-474.
- 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 [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(3):467-474.
- [13] Wang X, Cammeraat E L, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014,72:55-65.
- [14] Van Oost K, 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.
- [15] Yue Y, Ni J, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO<sub>2</sub> flux induced by water erosion in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016,113(24):6617-6622.
- [16] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998,12(2):231-257.
- [17] Jacinthe P A, Lal R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events [J]. Land Degradation & Development, 2001,12(4):329-339.
- [18] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004,304(5677):1623-1627.
- [19] Lal R, Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source [J]. Science, 2008,319(5688):1040-1042.
- [20] 中国水土流失防治与生态安全(西北黄土高原区卷) [M]. 北京:科学出版社, 2010.
- Soil erosion control and ecological security in China (volume of Northwest Loess Plateau) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [21] 贾松伟,贺秀斌,韦方强.黄绵土土壤活性有机碳的侵蚀和沉积效应 [J]. 水土保持通报, 2007,27(2):10-13.
- Jia S W, He X B, Wei F Q. Erosion and deposition effects of soil labile organic carbon in loessal Soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27(2):10-13.
- [22] 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.
- Li G L, Yao J, Pang X M. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in loess hills region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(4):740-744.
- [23] 耿肖臣,李 勇,于寒青,等.坡耕地侵蚀区和堆积区初春土壤呼吸的变化 [J]. 核农学报, 2012,26(3):543-551,593.
- Geng X C, Li Y, Yu H Q, et al. The variations of soil respiration at the eroded and deposited sites of the cultivated slopes during early spring time [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012,26(3):543-551,593.
- [24] 陈 盖,许明祥,张亚锋,等.黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 [J]. 环境科学, 2015,36(9):3383-3392.
- Chen G, Xu M X, Zhang Y F, et al. Characteristics of soil respiration along eroded sloping land with different SOC background on the Hilly Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2015,36(9):3383-3392.
- [25] 李如剑,张彦军,赵 慢,等.坡度和降雨影响土壤 CO<sub>2</sub> 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.
- Li R J, Zhang Y J, Zhao M, et al. Simulation on the effects of slope and rainfall on soil CO<sub>2</sub> flux and SOC loss [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(4):1336-1342.
- [26] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink [J]. Bioscience, 2007,57(4): 337-346.
- [27] Starr G C, Lal R, Malone R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes [J]. Land Degradation & Development, 2000, 11(1):83-91.
- [28] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. Nature, 1990,348:232-234.
- [29] 李 嵘,李 勇,李俊杰,等.黄土丘陵侵蚀坡地土壤呼吸初步研究 [J]. 中国农业气象, 2008,29(2):123-126.
- Li R, Li Y, Li J J, et al. A preliminary study on soil respiration of eroded sloping land in Chinese Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008,29(2):123-126.
- [30] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,72: 145-151.
- [31] 邵明安,上官周平.控制水土流失促进黄土高原生态环境建设 [J]. 中国基础科学, 2000,(6):49-53.
- Shao M A, Shang G Z Q. Ecological reconstruction of the Loess Plateau and control of soil and water loss [J]. China Basic Science, 2000,(6):49-53.
- [32] 夏 彬,朱世硕,郝旺林,等.黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2020,34(3): 175-181.
- Xia B, Zhu S S, Hao W L, et al. Effects of soil organic carbon content on temporal and spatial change of surface soil water content on eroded slope in the Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2020,34(3):175-181.
- [33] 穆兴民,李朋飞,高 鹏,等.土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评 [J]. 人民黄河, 2016,38(10):100-110,114.
- Mu Xi M, Li P F, Gao P, et al. Review and evaluation of soil erosion models applied to China Loess Plateau [J]. Yellow River, 2016,38(10):

- 100-110,114.
- [34] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望 [J]. 自然杂志, 2008,30(1):12-16,63.  
Zheng F L, Wang Z L, Yang Q K. The retrospection and prospect on soil erosion research in China [J]. Chinese Journal of Nature, 2008, 30(1):12-16,63.
- [35] 杜兰兰,王志齐,王蕊,等.模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤CO<sub>2</sub>通量变化及其影响因素 [J]. 环境科学, 2016,37(9):3616-3624.  
Du L L, Wang Z Q, Wang R. Variation of soil CO<sub>2</sub> flux and environmental factors across erosion deposition sites under simulation experiment [J]. Environmental Science, 2016,37(9):3616-3624.
- [36] 张蕾,依艳丽,贺忠科,等.沈阳市郊玉米连作土壤有机质组成及其对土壤结构的影响 [J]. 土壤通报, 2008,39(4):756-760.  
Zhang L, Yi Y L, He Z K, et al. Compositions of organic matter in soil in continuous corn cropping soil in Shenyang suburban and affect on soil structure [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008,39(4):756-760.
- [37] 宋日,刘利,吴春胜,等.东北松嫩草原土壤开垦对有机质含量及土壤结构的影响 [J]. 中国草地学报, 2009,31(4):91-95.  
Song R, Liu L, Wu C S, et al. Reclamation on organic matter content and structural properties in steppe soil of Northeast Songnen Plain [J]. Chinese Journal of Grassland, 2009,31(4):91-95.
- [38] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1998,17(4):319-464.
- [39] 徐英德,汪景宽,王思引,等.玉米残体分解对不同肥力棕壤团聚体组成及有机碳分布的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2018,26(7):1029-1037.  
Xu Y D, Wang J K, Wang S Y, et al. Effects of maize residue decomposition on aggregate composition and organic carbon distribution of different fertilities brown soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(7):1029-1037.
- [40] 陈奇伯,齐实,孙立达,等.半干旱黄土丘陵区坡耕地径流损失对土地生产力影响研究 [J]. 水土保持通报, 2001,21(5):6-9.  
Chen Q B, Qi S, Sun L D, et al. Impacts of runoff on land productivity of sloping field in Semi-arid hilly and gully region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(5):6-9.
- [41] 黄满湘,章申,张国梁,等.北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理 [J]. 地理学报, 2003,58(1):147-154.  
Huang M X, Zhang S, Zhang G L, et al. Losses of nitrogen nutrient in overland flow from farmland in Beijing under simulated rainfall conditions [J]. Acta Geographica Sinica, 2003,58(1):147-154.
- [42] 周继.人工模拟降雨条件下土壤颗粒变化及养分流失的研究 [D]. 重庆:西南大学, 2009.  
Zhou J. Study on the change of soil Particle and loss of nutrient based on rainfall simulator [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [43] 王桂芳.硫化矿尾矿库周围水土污染调查及化学溶液对土壤侵蚀影响的模拟研究 [D]. 南宁:广西大学, 2005.  
Wang G F. Investigation on pollution of water and soil around sulfide-mine tailing dams and simulation study on soil erosion of chemical solution [D]. Nanning: Guangxi University, 2005.
- [44] Qiu L P, Zhang Q, Zhu H S, et al. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality [J]. Isme Journal, 2021.doi.org/10.1038/s41396021-00913-1.
- [45] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2005,20(7):778-785.  
Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7):778-785.
- [46] Novara A, Armstrong A, Gristina L, et al. Effects of soil compaction, rain exposure and their interaction on soil carbon dioxide emission [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012,37(9):994-999.
- [47] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub> [J]. Global Change Biology, 2006,12(2):154-164.
- [48] Mande H K, Abdullah A M, Aris A Z, et al. Factors responsible for spatial and temporal variation of soil CO<sub>2</sub> efflux in a 50-year recovering tropical forest, Peninsular Malaysia [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73:5559-5569.
- [49] Chen C R, Xu Z H. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2008,8(6):363-378.
- [50] 张睿,白杨,刘娟,等.亚热带天然阔叶林转换为杉木人工林对土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2015,26(10):2946-2952.  
Zhang R, Bai Y, Liu J, et al. Effects of conversion of natural broad-leaved forest to Chinese fir plantation on soil respiration in subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10):2946-2952.
- [51] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation [J]. Geomorphology, 2014,226:217-225.
- [52] 周萍,刘国彬,薛蕙.草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展 [J]. 草业学报, 2009,18(2):184-193.  
Zhou P, Liu G B, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2):184-193.
- [53] Chen S T, Huang Y, Zou J W, et al. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010,150(4):590-605.

**作者简介:** 郝旺林(1984-),男,山西五寨人,讲师,中国科学院水利部水土保持研究所博士研究生,研究方向为土壤生态与碳循环.发表论文5篇.