

高寒土细沟侵蚀中有机碳迁移影响因素及 预测模型构建

周金龙¹ 梁万栋² 陈松焱¹ 高鑫¹ 喻武^{1*} 高志康¹

(1. 西藏农牧大学 资源与环境学院, 西藏林芝 860000; 2. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南长沙 410000)

摘要 为了解高寒土细沟侵蚀中有机碳流失的影响因素, 构建符合区域侵蚀特征的有机碳迁移模型, 本文选取影响寒区土壤侵蚀的4个因子: 砾石覆盖度 (Rc)、坡长 (L)、坡度 (S)、流量 (Q), 采用全因子设计方法进行沟槽放水冲刷试验, 结果显示: (1) Rc 与 S 对有机碳流失影响较大, 而 L 与 Q 对于有机碳流失影响较小; (2) 影响因子对于有机碳流失的敏感性与贡献率大小一致, 排序为: Rc (68.69%) > S (18.97%) > Q (6.00%) > $S \times Q$ (2.09%) > $Rc \times S$ (2.08%) > $Rc \times Q$ (1.18%) > L (0.91%)。 $Rc \times L$ 、 $S \times L$ 和 $L \times Q$ 这3组交互作用对有机碳流失的影响不显著 ($P > 0.05$); (3) Rc 、 S 和 Q 对有机碳流失的影响累计贡献率为93.66%, 可以解释大部分有机碳流失量的变化, 通过这3个因子建立有机碳流失量预测模型: 有机碳流失量 = $0.6231 Rc + 1.998 S + 6.885 Q - 0.006849 \times Rc^2 - 0.06073 S^2 - 1.108 \times Q^2$, 模型经实测值检验 $R^2 = 0.8352$ 、 $NSE = 0.722545$, 模型基本适用且达到预报精度, 曼惠妮特检验值 $P = 0.724 > 0.05$, 模型预测值与实测值两组数据间无明显差异。对比全因子模型各项检验指标, 部分因子模型自变量少, 方程简单, 且精度未明显降低, 对因变量具有较高的解释度, 因而更适合信息获取困难, 环境复杂的藏东南细沟侵蚀中有机碳流失量的预测。

关键词 高寒土; 砾石覆盖; 全因子试验; 径流冲刷; 有机碳流失; 模型

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-4781 (2025) 06-0756-11

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2025.06.009

The Influencing Factors and Prediction Model Construction of Organic Carbon Transfer in Rill Erosion of Alpine Soil

ZHOU Jinlong¹, LIANG Wandong², CHEN Songyan¹, GAO Xin¹, YU Wu^{1*}, GAO Zhikang¹

(1. College of Resources and Environment, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of organic carbon transfer (M_{soc}) in rill erosion in alpine soil and to construct an organic carbon migration model that conforms to regional erosion characteristics, this study selected four factors that affect soil erosion: gravel cover degree, slope length, slope, and flow rate (Rc , L , S , Q). A full factorial design method was used to conduct runoff erosion experiments. The main results were as follow: (1) M_{soc} varies parabolically with Rc , and there was a positive correlation between M_{soc} and Rc when Rc below the critical value, and a negative correlation between Rc and M_{soc} above the critical value, with a

收稿日期: 2025-02-13

作者简介: 周金龙 (2000-), 男, 汉族, 贵州遵义人, 硕士。研究方向: 主要从事土壤机理方面的研究。

通信作者: 喻武 (1981-), 男, 汉族, 湖南益阳人, 博士, 教授。研究方向: 主要从事土壤侵蚀和生态修复方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (32060370), 藏东南冻融水力侵蚀交错带砾石空间分布格局及土壤侵蚀影响机制; 西藏农牧大学质量工程项目 (710030007), 水土保持专业人才培养模式探索。

critical value of around 45%; M_{soc} increased with S , and the rate of increase gradually decreased. L and Q had a small impact on M_{soc} . (2) The sensitivity and contribution rate of the factors to M_{soc} were consistent, with Rc (68.69%) > S (18.97%) > Q (6.00%) > $S \times Q$ (2.09%) > $Rc \times S$ (2.08%) > $Rc \times Q$ (1.18%) > L (0.91%). The interactions of $Rc \times L$, $S \times L$, and $L \times Q$ had no significant effect on M_{soc} ($P > 0.05$). (3) Rc , S , and Q had a cumulative contribution rate of 93.66% to M_{soc} , which can explain most of the M_{soc} variation. A redictive model for M_{soc} was established based on these three factors: $M_{\text{soc}} = 0.6231Rc + 1.998S + 6.885Q - 0.006849Rc^2 - 0.06073S^2 - 1.108Q^2$. The model was tested with measured values, and the R^2 value was 0.8352, the NSE value was 0.722545, and the P-value of the Mann-Whitney test was 0.724, which indicated that the model was basically applicable and achieve high prediction accuracy. Compared with the various test indicators of the full factor model, some factor models had fewer independent variables, simpler equations, and basically no decrease in accuracy. They had a high explanatory power for the dependent variables, making them more suitable for predicting M_{soc} in the southeast of Tibet, where information acquisition was difficult and the environment was complex.

Key words: Alpine soil; Gravel cover; Full factorial design of experiment; Runoff erosion; Organic carbon loss; Model

土壤作为人类赖以生存的自然资源，是全球农业发展和粮食生产不可或缺的物质基础。然而，随着全球人口数的不断增长，人均有效耕地面积随之减少，人口—资源—环境三者间的矛盾日益突出，人类对土壤资源的不合理利用正在引发全球性的可持续发展问题^[1-3]。其中最重要的一个问题就是由土壤侵蚀所引起的土地质量退化^[4]。同时土壤侵蚀也是造成地球表面土壤有机碳迁移、流失加剧的主要原因^[5]。土壤有机碳是指通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体中的碳元素^[6]。土壤中有有机碳发生迁移或流失至大气中时，会对全球气候变暖产生明显的影响^[7]。

在全球变化和人类活动的双重驱动下，青藏高原高海拔寒区冰川冻土加速融化，水土流失有加剧的趋势^[8]。山顶因其特殊的环境，极易孕育细沟^[9]，而该区域也是陆地生态系统中有有机碳的重要储存地理单元和迁移敏感区域^[10,11]。藏东南地处青藏高原腹地，山体高耸，坡面陡峭，降水充沛，加之冰川冻融作用，为土壤侵蚀的发生提供了良好的客观条件。土壤侵蚀对有机碳迁移的作用机制表现为：降雨过程中有机碳在泥沙吸附和径流输移的共同作用下发生空间上的移动^[12]。土壤侵蚀是一个多因素复合影响的过程。侵蚀量会随雨强的增大而增加，且泥沙中有机碳流失量也越高^[13]；随着坡长的延长，侵蚀量随着雨强的增长越大，携带的有机碳越多，两者呈幂函数关系^[14]。基于青藏高原独特的地质环境，发生土壤侵蚀时，复杂的内外营力会导致岩石被破坏、搬运和沉积，使砾石广泛分布在山顶地表及土壤中^[15-17]。砾石是指土壤中直径大于2 mm的矿物颗粒^[18]。在土壤侵蚀过程中砾石的主要作用表现在以下两个方面：一方面是保护土壤表面，以减轻或防止雨滴和径流对土壤的破坏，削弱径流对表层土壤的冲刷作用，即直接影响土壤侵蚀过程^[19]；另一方面主要是影响土壤的物理性质和水文过程，这属于间接影响土壤侵蚀过程^[20]。有研究表明，砾石覆盖会延缓地表径流，从而降低含沙量和土壤流失量。但也有学者有不同结论，当坡度一定时，侵蚀量随着砾石覆盖度的增加而增加^[21]，但侵蚀量并不是随着砾石覆盖度的增加而一直增大，而是侵蚀量随砾石覆盖度的增加呈先增大后减小的趋势^[22]。

鉴于土壤侵蚀是一个多因素复合影响的过程，而当前研究多侧重于单个因子对土壤侵蚀的影响，并

不清楚多因素复合作用下土壤侵蚀机理。因此,探究多因素复合下土壤侵蚀对有机碳迁移的变化以及确定各个因素对有机碳迁移的重要性已成为一个重要的研究课题。为探究土壤侵蚀中条件因子及其交互作用对有机碳流失的影响关系,采用全因子实验设计方法^[23]。全因子试验方法提取的信息量非常全面,能较为科学地安排试验,并能给出试验实施的具体程序^[24]。全因子试验虽然需要较多的试验次数,但优点是可以得到准确可靠的结果,并计算出所有因素的主效应和交互效应。目前,涉及2个或2个以上因子对土壤侵蚀影响的试验中,一般都采用全因子设计^[25-29]。

为此,本研究选取藏东南色季拉山高寒土为研究对象,通过室内模拟冲刷试验,采用全因子实验设计,得到细沟侵蚀中不同条件因子组合下的有机碳流失量。基于试验结果分析因子的主效应、交互效应,并通过方差分析判断因子对有机碳流失的敏感性以及贡献率,以上述结果为基础建立回归模型。研究结果可为青藏高原土壤侵蚀中有机碳流失预测与土壤侵蚀治理奠定科学理论与实践基础。

1 材料与方方法

1.1 试验地点与试验土壤

试验于2022年3月至2022年10月在西藏农牧大学水土保持创新人才基地的人工模拟降雨大厅进行。试验所用土壤取自色季拉山(94°28′-94°51′E, 29°21′-29°50′N)海拔4 376 m处“缓凸型”沉积地带的高寒土。在细沟侵蚀的搬运过程中,高寒土受地形限制、砾石阻滞等方面影响,许多细小颗粒沉积在平缓的山坡或山麓地带,土壤颗粒细腻、有机碳含量较高。土壤过10 mm孔筛后备用。本试验的土槽填土容重控制为1.1 g/cm³。试验前,将土壤风干后测其机械组成,沙粒(2~0.05 mm)含量为42.53%、粉粒(0.05~0.002 mm)含量为52.18%、黏粒(<0.002 mm)含量为5.29%,按照美国制划分标准确定其为粉砂质壤土。

1.2 试验装置与试验设计

本研究为室内模拟冲刷试验,装置由供水器、稳流槽、土槽3部分组成(图1),其中土槽规格为:800×10×10 cm(长×宽×高)。

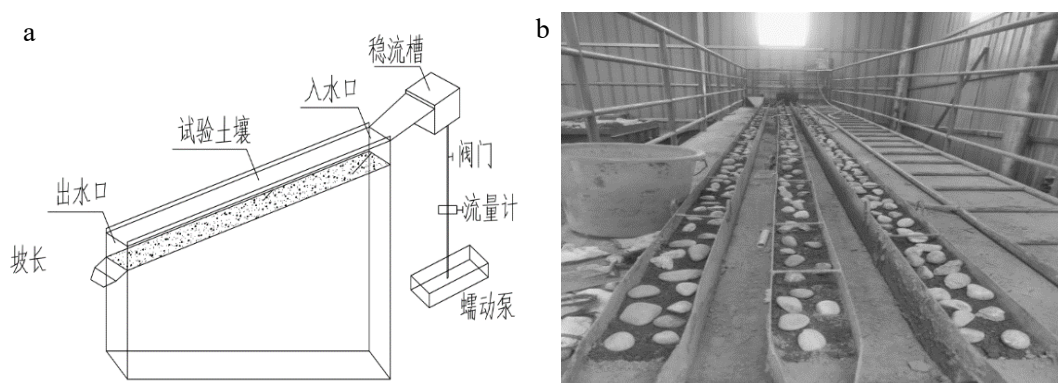


图1 装置示意图

Fig.1 Schematic Diagram of the Experimental Setup

试验前将过筛土壤除去杂草后填入土槽,填土深度约为10 cm,填土容重控制为1.1 g/cm³。为减少边缘效应,尽量压实与土槽边界接触处的土壤,使土槽呈浅“U”形。为减少填土不均匀的影响,将装填好

的土壤充分饱和后,静置24 h以上,从而保证均匀一致的初始含水量以及消除填装不均匀的影响。试验开始前,取土槽内上、中、下3个部位的土壤进行有机碳的测定。根据前人研究,细沟侵蚀对于输沙能力的临界坡长在6~7 m以内^[30]。试验过程中待流量稳定后将稳流槽分别移至1、2、3、4、5、6、7 m处分别进行冲刷,在出水口用水杯收集泥沙混合样4个,分别测量其体积与称重。将收集和称重的泥沙混合样品静置24 h至澄清后,倒掉上部的大部分清水,放入烘箱中烘干后再称重,再计算有机碳含量。

冲刷前后土壤有机碳的测定方法为重铬酸钾加热法^[31]。

采用全因子实验设计方法构建冲刷试验,对砾石覆盖度、坡度、坡长、流量因子进行试验设计,并考虑4个因子间的交互效应。依据实地调查并结合气象数据,砾石覆盖度(R_c)考虑3水平(0%、40%、70%)、坡度(S)考虑4水平(5°、10°、15°、20°)、流量(Q)考虑3水平(1 L/min、2 L/min、4 L/min),并设置全因子试验未考虑组合(9组)用于模型有效性评价,试验共计117次。值得注意的是,流量为设置值,实际冲刷试验时可能存在的微小偏差。尽管偏差较小,仍需在每一次试验时使用流量计测量流量,并将实测流量作为该组数据用于拟合模型时的自变量。

1.3 数据处理

有机碳含量计算式为:

$$SOC = \frac{0.8 \times 5}{v_0} \times (v_0 - v) \times 0.003 \times 1.1 \times 1000 \quad (1)$$

式中, SOC 为有机碳含量, k/kg; 0.8为重铬酸钾标准溶液浓度, mol/L; v_0 为空白试验消耗硫酸亚铁铵标准溶液体积, mL; v 为土样消耗硫酸亚铁铵标准溶液体积, mL; 0.003为1/4碳原子的毫摩尔质量, g/mol; 1.1为氧化校正系数。

利用方差分析可进行因子主效应分析和有机碳流失量影响的显著性检验。方差分析的结果可估算不同因素对有机碳流失量的贡献率,计算式为:

$$PC = \frac{SS_F - (DF \times V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中, PC 为因子贡献率, %; SS_T 为总离差平方和; SS_F 为各因子离差平方和; V_{Er} 为误差平方和; DF 为因子的自由度。

方差分析借助统计量 F 值来判定显著性,其计算方法如下: $F = \frac{MS_i}{MS_e}$ (3)

式中 MS_i 为各因素的均方; MS_e 为误差的均方。

模型有效性评价采用决定系数(R^2)、模型有效性系数(NSE)以及曼惠妮特检验(Mann-Whitney) 3种评价指标相结合的方法对模型进行率定和验证。其中, R^2 、NSE的计算方法如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O)(S_i - S)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - S)^2} \quad (5)$$

式中, O_i 为第 i 个实测值; S_i 为对应的第 i 个模型估算值; O 为实测值的平均值; S 为模型估算值的平均值; n 为样本数量。

R^2 和 NSE 的联合评价方法常用于模型的有效性验证,且认为 $NSE > 0.5$ 和 $R^2 > 0.5$ 时模型达到预报精度。同时,为确保决定系数(R^2)和模型有效性系数(NSE)联合评价方法的可靠性,在模型校验时,对估算结果与实测值采用曼惠妮特检验,判断两组数据间的差异性。如果达到显著性差异水平则说明模型估算结果偏差较大,模型不适用;反之,当检验值($P > 0.05$)则表明两组数据间无明显差异,估算模型基本适用。

试验结果处理采用Minitab16软件、Excel、SPSS并利用Origin9.0软件绘图。

2 结果与分析

2.1 有机碳流失的影响因子

以砾石覆盖度(Rc)、坡度(S)、坡长(L)和流量(Q)为变量,有机碳流失量为响应绘制箱线图如图2。通过图2a可以看出,有机碳流失量随着 Rc 的增大呈现的变化趋势为:先增加后减小;通过图2b可以看出,有机碳流失量随着 S 的增大呈现的变化趋势为:先增加后减小,但变化幅度不大;从图2c、2d可以看出,有机碳流失量随着 L 和 Q 的增大变化幅度不大,整体样本区间上下浮动很小。综上可知,有机碳流失量的变化主要受 Rc 与 S 的影响。

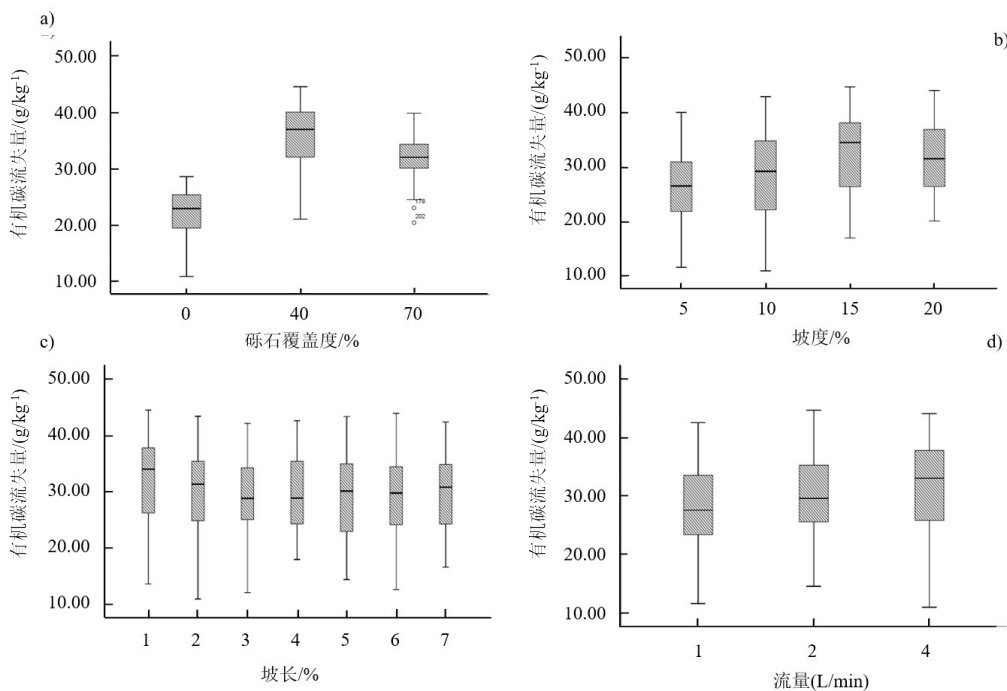


图2 单因子影响下有机碳流失特征

Fig.2 Effects of Individual Factors on Organic Carbon Loss

2.2 有机碳流失影响因子的主效应及交互效应

Rc 、 S 、 L 和 Q 对有机碳流失量的主效应如图3所示。造成有机碳流失量差异明显的因子有 Rc 、 S 。有机碳流失量随着 S 的增大而增加,斜率逐渐减小;随着 Rc 增大有机碳流失量变化为先增加后减少, Rc 由0%增大为40%时有机碳流失量逐渐增大,斜率逐渐减小, Rc 由40%增大为70%时有机碳流失量逐渐减小。相比 Rc 与 S 来说, L 和 Q 对有机碳流失量的影响较小。有机碳流失量随着 Q 的增大而增加,但变化幅

度相对较小；有机碳流失量随着L增长呈现的趋势为：先减少后增加。在土壤侵蚀中，不仅单因子的改变会造成侵蚀结果，因子间的交互作用也会造成侵蚀结果的变化，因此还需进行因子交互作用分析。

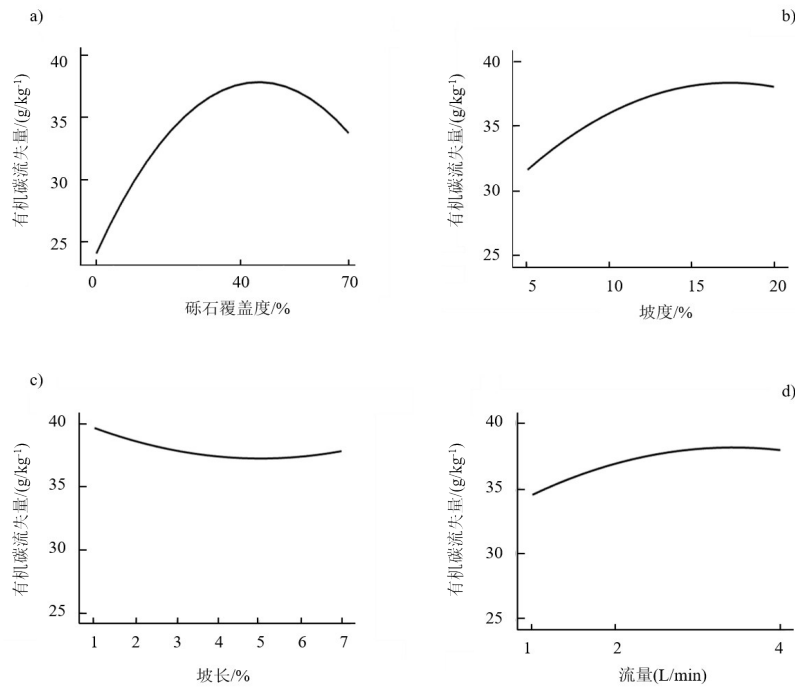


图3 因子对有机碳流失的主效应

Fig.3 Main Effects of Experimental Factors on Organic Carbon Loss

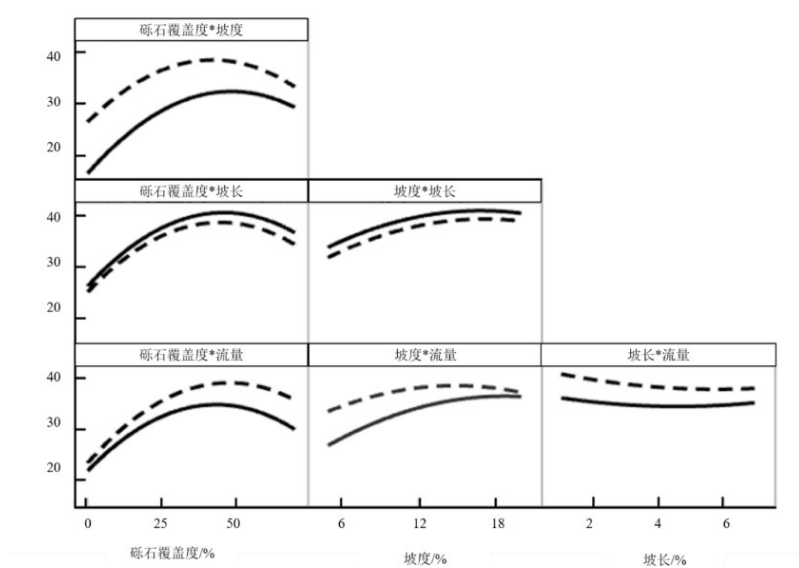


图4 因子两两交互作用对有机碳流失的效应

Fig.4 Effects of Two-Way Factor Interactions on Organic Carbon Loss

Rc、S、L和Q两两交互，交互作用对有机碳流失量的效应如图4所示。对于有机碳流失量，仅有S × Q、Rc × Q和Rc × S这三组交互作用的效益线相对角度明显较大，说明S × Q、Rc × Q和Rc × S的交互效应显著^[32]，即一个因子的变化会受到另一因子的变化而影响。而L × Q、S × L和Rc × L这三组交互作用的

效益线相对角度较小,说明交互效应不显著。

2.3 因子敏感性评价

方差分析结果见表1, F值越大则敏感性越强。由表可知,对于有机碳流失敏感性排序为 $Rc > S > Q > S \times Q > Rc \times S > Rc \times Q > L > L \times Q > Rc \times L > S \times L$ 。但由于 $L \times Q$ 、 $Rc \times L$ 和 $S \times L$ 这3组交互作用不显著,故有机碳流失敏感性排序为 $Rc > S > Q > S \times Q > Rc \times S > Rc \times Q > L$,与主效应和交互效应分析结果一致。因子对于 M_{soc} 贡献率排序为: Rc (68.69%) > S (18.97%) > Q (6.00%) > $S \times Q$ (2.09%) > $Rc \times S$ (2.08%) > $Rc \times Q$ (1.18%) > L (0.91%)。

表1 基于方差分析的各因子对有机碳流失的显著性影响及贡献率

Tab.1 Significant Effects and Contribution Rates of Factors on Organic Carbon Loss Based on ANOVA

因子	均方和(SS_F)	F	显著性	因子贡献率/%
砾石覆盖度(Rc)	7 545.8	654.05	0.000	68.69%
坡度(S)	2 083.7	180.61	0.000	18.97%
坡长(L)	100.0	8.67	0.044	0.91%
流量(Q)	659.7	57.19	0.000	6.00%
砾石覆盖度×流量($Rc \times Q$)	130.3	11.29	0.001	1.18%
砾石覆盖度×坡度($Rc \times S$)	228.1	19.77	0.000	2.08%
砾石覆盖度×坡长($Rc \times L$)	6.6	0.57	0.450	0.06%
坡度×坡长 $S \times L$	1.0	0.08	0.773	0.01%
坡度×流量($S \times Q$)	229.3	19.88	0.000	2.09%
坡长×流量($L \times Q$)	1.55	1.55	0.214	0.01%

2.4 模型构建及优化

由方差分析可知, Rc 、 S 、 L 、 Q 这4个因子主效应显著, $Rc \times Q$ 、 $Rc \times S$ 、 $S \times Q$ 这3个二阶交互作用显著,其余二阶交互作用不显著。而因子之间的三阶及四阶交互效应显著性太小,不予分析。将有机碳流失量与显著因子建立全因子回归模型,模型如下:

$$\text{有机碳流失量} = 0.6785 Rc + 2.326 S - 1.222 L + 6.680 Q - 0.006808 Rc^2 - 0.05318 S^2 + 0.1173 L^2 - 0.888 Q^2 - 0.00595 Rc \times S + 0.01908 RcQ - 0.1346 SQ$$

$$\text{模型 } R^2 = 0.9880, R^2(\text{预测}) = 0.9875。$$

结合藏东南实地情况,藏东南气候、地形复杂,在有机碳流失预报时会遇到因子采集困难的状况,因此需要因子并不复杂但又能达到预报效果的模型。为避免模型出现过度拟合情况,通过2.3部分内容发现 Rc 、 S 和 Q 累计贡献率达到93.66%,已经可以解释有机碳流失大部分的原因。通过 Rc 、 S 和 Q 这3个因子建立部分因子回归模型,模型如下:

$$\text{有机碳流失量} = 0.6231 Rc + 1.998 S + 6.885 Q - 0.006849 Rc^2 - 0.06073 S^2 - 1.108 Q^2$$

$$\text{模型 } R^2 = 0.9852, R^2(\text{预测}) = 0.9848。可见模型依然能达到预测精度。$$

2.5 模型有效性评价

选取不同于试验设计的组合,进行观测,得到一组实测值,分别用全因子回归模型、部分因子回归模型预测,可得到两组不同预测值。通过曼惠妮特检验可判断数据间的差异性,由表4可知,实测值与全因子回归模型预测值之间的检验值 ($P=0.536 > 0.05$),预测值与实测值无明显差异;实测值与部分因子回

归模型预测值之间的检验值 ($P=0.724 > 0.05$), 预测值与实测值无明显差异。全因子模型有效性系数 $NSE = 0.725561 > 0.5$, 模型可达到预报精度要求; 部分因子模型有效性系数 $NSE=0.722545 > 0.5$, 模型达到预报精度要求。

表 2 曼惠妮特 (Mann-Whitney) 检验

Tab.2 Mann-Whitney U Test

模型	检验值(P)	NSE
全因子模型	0.536	0.725 561
部分因子模型	0.724	0.722 545

通过实测值分别与全因子回归模型预测值、部分因子模型预测值绘制 1:1 线 (图 5), 由图 5 可知, 全因子模型估算有机碳流失量 = $1.223 \times$ 实测有机碳流失量 - 5.218, 决定系数 $R^2=0.87$; 部分因子模型估算有机碳流失量 = $1.018 \times$ 实测有机碳流失量 - 1.330, $R^2=0.835$ 。

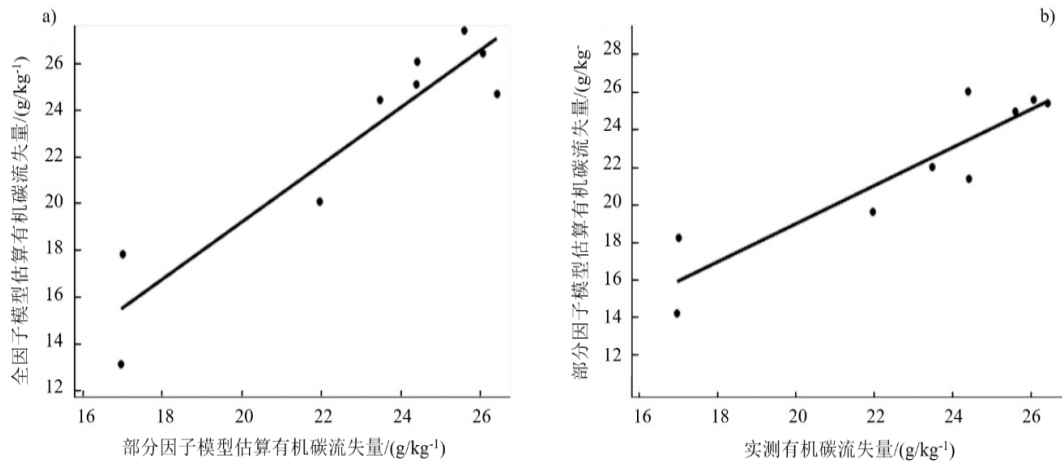


图 5 模型估算有机碳流失量与实测有机碳流失量偏差预测

Fig.5 Deviation Between Modeled and Measured Organic Carbon Loss

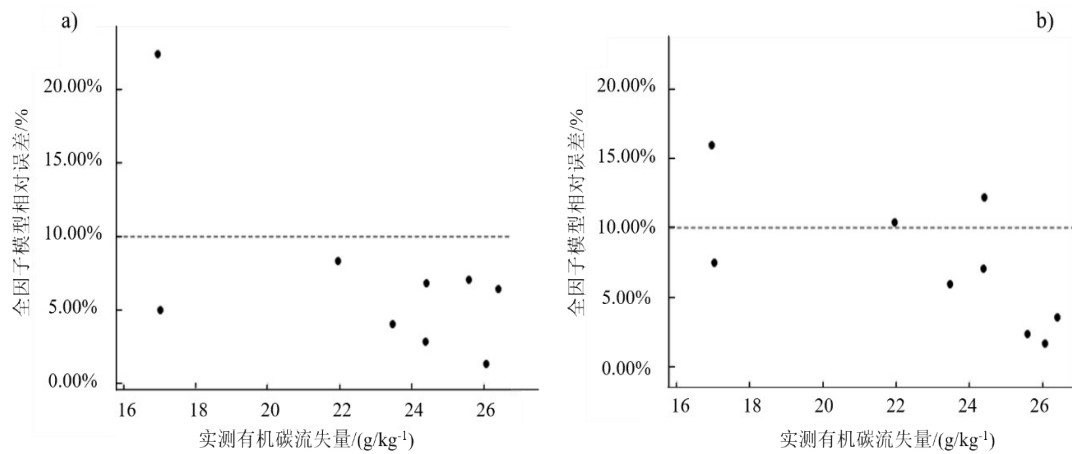


图 6 模型相对误差

Fig 6 Relative Error of the Model

实测值与预测值的相对误差在一定程度上能反映预测效果的优劣。由图6a可知,全因子模型相对误差介于1%~23%之间,其中90%实测值相对误差小于10%;由图6b可知,部分因子模型相对误差介于1%~16%之间,其中60%实测值相对误差小于10%。全因子模型除一个点外,其余所有点位的相对误差都小于10%,而部分因子模型相对误差多集中于10%左右。

通常模型有效性系数 $NSE > 0.5$ 和决定系数 $R^2 > 0.5$ 时模型达到预报精度要求。通过上述分析,全因子模型 $R^2=0.8698 > 0.5$ 且 $NSE=0.725561 > 0.5$,模型达到预报精度要求,且相对误差小于10%;部分因子模型 $R^2=0.8352 > 0.5$ 且 $NSE=0.722545 > 0.5$,模型达到预报精度要求且相对误差集中于10%左右。全因子模型精度更高,但模型较为复杂,模型在实地数据比较齐全且考虑因子间交互作用时较适用;相比全因子模型,部分因子模型 R^2 低于全因子模型,但也能达到预报精度,在实地数据收集较难且仅考虑单因子对有机碳流失量的影响时较适用。

3 讨论

本研究结果表明,砾石覆盖下土壤侵蚀中有机碳迁移过程机制是极其复杂的,会受到 Rc 、 Q 、 L 、 S 这4个因素影响。有机碳流失量随着侵蚀量的变化而变化^[13]。在前文中发现 Rc 对于有机碳流失的贡献最大,很大部分原因是:砾石的存在会影响到水分入渗以及径流的产生,从而导致侵蚀量的变化。砾石对入渗具有不确定的影响^[33,34],一方面,砾石直接阻止了水分入渗,在许多情况下甚至能增加地表径流;另一方面,砾石对土壤表面具有保护作用,能降低水流对土壤表面结构的破坏,抑制土壤结皮,这又会使入渗增加。在试验中发现,径流冲刷时,由于砾石的存在会导致水流形成汇流现象,从而诱导形成大量切沟并导致侵蚀量的增大。当 Rc 增大时,其嵌入土体的砾石越多,砾石与土壤之间更易形成剧烈的侵蚀,导致侵蚀量的显著增加,但随着 Rc 不断增大时,大部分的土壤被砾石所覆盖,砾石降低了径流的冲刷作用。这可能是有机碳流失量随着 Rc 的增大呈现先增加后减小变化趋势的原因。因为砾石会影响到地表径流的产生,所以在土壤侵蚀中流量会因砾石的存在而被掩盖,这或许是 Rc 成为对有机碳流失贡献率最高的因子的原因。值得注意的是,在土壤侵蚀中不仅 Rc 会影响土壤入渗以及径流的产生,砾石在土壤中的位置^[35]、尺寸^[36]均会影响到土壤入渗以及径流的产生;同时砾石在土壤中的位置、尺寸还会影响到冲刷过程中切沟的形成位置以及切沟宽度。在本次试验中仅考虑到 Rc 这一个因素,并未考虑砾石的位置及尺寸,在今后的研究中应该更为深入地探讨砾石位置及尺寸对有机碳流失的影响。

在土壤侵蚀中单因子的改变会导致侵蚀量的改变,进而导致有机碳流失量的改变,因子间的相互作用及交互作用也会导致有机碳流失量的改变,例如砾石会改变 Q 在某个强度下原本应产生的径流,从而导致有机碳流失量的变化。在上文研究发现:交互作用对于有机碳流失量的贡献基本小于单因子贡献,这是因为在数理统计的规律中会把交互作用大部分贡献归于单因子贡献中,但在构建预测模型时并不会因为交互作用的贡献被掩盖而导致模型预测有误,本文构建的模型经过模型有效性评价后,均达到预测精度且相对误差小。但交互作用与单因子作用是两个完全不同的影响,在今后的研究中应该设计更巧妙的试验方案单独考虑交互作用的影响。

本研究针对 Rc 、 Q 、 L 和 S 这4个因子在细沟侵蚀中对于有机碳流失的影响进行了一些探讨,然而研究尺度的改变可能导致不同的研究结论^[36],有机碳离开沟道以后,可能在小流域内发生再分布,形成局

地碳汇,也有可能离开小流域后随着水体系统进入更大尺度的生物化学碳循环。本研究主要考虑砾石覆盖下细沟侵蚀对有机碳迁移机制的作用,涉及有机碳的化学结构和动态的微生物学机理较少,然而不同尺度有机碳动态的主要影响因素是不同的,在今后研究中应该更为深入地进行探讨。因子的选择及因子水平的改变也可能导致不同的研究结论,在今后研究中应根据实际研究需要选取因子以及设定因子水平。

4 结论

(1) 砾石覆盖度 (Rc) 和坡度 (S) 对有机碳流失的影响较大,有机碳流失量随着 Rc 的增大呈现变化趋势为:先增加后减小;随着 S 的增大呈现变化趋势为:先增加后减小,但变化幅度较小;坡长 (L) 和流量 (Q) 对有机碳流失的影响较小,随着 L 与 Q 的变化,有机碳流失量变化幅度较小。

(2) 所有单因子均对有机碳流失量的变化有显著影响,二阶交互作用中有:流量×坡度 ($S \times Q$)、砾石覆盖度×流量 ($Rc \times Q$) 和砾石覆盖度×坡度 ($Rc \times S$) 对有机碳流失有显著影响,而砾石覆盖度×坡长 ($Rc \times L$)、坡度×坡长 ($S \times L$) 和坡长×流量 ($L \times Q$) 这3组交互作用对有机碳流失的影响不显著,因子对于有机碳流失的敏感性与贡献率大小一致,排序为: Rc (68.69%) > S (18.97%) > Q (6.00%) > $S \times Q$ (2.09%) > $Rc \times S$ (2.08%) > $Rc \times Q$ (1.18%) > L (0.91%)。

(3) 通过对有机碳流失有显著影响的因子进行回归建模,得到全因子模型:有机碳流失量 = $0.6785Rc + 2.326S - 1.222L + 6.680Q - 0.006808Rc^2 - 0.05318S^2 + 0.1173L^2 - 0.888Q^2 - 0.00595Rc \times S + 0.01908Rc \times Q - 0.1346S \times Q$ 。

Rc 、 S 、 Q 这3个因子对于有机碳流失的影响的累计贡献率为93.66%,通过3个因子进行回归建模,得到部分因子模型:有机碳流失量 = $0.6231Rc + 1.998S + 6.885Q - 0.006849Rc^2 - 0.06073S^2 - 1.108Q^2$ 。

(4) 通过模型有效性评价,全因子模型 $R^2=0.8698 > 0.5$ 、 $NSE=0.725561 > 0.5$ 、曼惠尼特检验值 ($P=0.536 > 0.05$),模型相对误差基本小于10%;部分因子模型 $R^2=0.8352 > 0.5$ 、 $NSE=0.722545 > 0.5$ 、曼惠尼特检验值 ($P=0.724 > 0.05$),模型相对误差集中在10%左右。部分因子模型基本适用且达到预报精度。全因子模型参数众多,较部分因子模型精度提高较少,部分因子模型在一定条件下可以代替全因子模型的预测功能。

参考文献:

- [1] 赵其国,史学正,张甘霖等.土壤资源概论[M].北京:科学出版社.2007.
- [2] Foley J A.Global Consequences of Land Use [J].Science,2005,309(5734):570-574.
- [3] Pimentel D.Soil Erosion:A Food and Environmental Threat[J]. Environment,Development and Sustainability,2006,8(1):119-137.
- [4] Lal,Rattan.Managing soils for feeding a global population of 10 billion[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2006, 86:2273-2284.
- [5] 贾松伟,贺秀斌,陈云明等.侵蚀逆境下土壤有机碳的迁移[J].生态环境,2004(01):78-80.
- [6] 刘敏,孙经国,徐兴良等.土壤元素失衡是导致高寒草甸退化的重要诱因[J].生态学杂志,2020,39(08):2574-2580.
- [7] Eichstein M,Bahn M,Ciais P,et al.Climate extremes and the carbon cycle[J]. Nature, 2013, 500(7462): 287-295.
- [8] 陈发虎,汪亚峰,甄晓林等.全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J].中国藏学,2021(04):21-28.
- [9] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊等.细沟发育与形态特征研究进展[J].生态学报,2018,38(19):6818-6825.
- [10] 杨元合,石岳,孙文娟等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(04):

534-574.

- [11] 张相,李肖,林杰等.南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征[J].农业工程学报,2020,36(19):115-123.
- [12] 温丽燕,王连峰等.侵蚀及土地利用管理方式改变对土壤有机碳的影响[J].中国农学通报,2007(07):362-365.
- [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[J].土壤学报,2012,49(03):465-473.
- [14] 付兴涛,张丽萍等.红壤丘陵区L对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(05):91-98.
- [15] 刘淑珍,张建国,辜世贤等.西藏自治区土壤侵蚀类型研究[J].山地学报,2006(05):592-596.
- [16] 张建国,文安邦,柴宗新等.西藏自治区土壤侵蚀特点及现状[J].山地学报,2003(S1):148-152.
- [17] 陈同德,焦菊英,王颢霖等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(03):547-564.
- [18] 高杨,符素华,罗来军等.北京山区Rc和砾石含量的关系研究.水土保持研究,2011,18(04):145-149.
- [19] 王婷.辽西低山丘陵区坡地砾石对土壤水分运动的影响[D].沈阳:辽宁工程技术大学,2017.
- [20] Poesen J, Van Wesemael B, Govers G, et al. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion[J]. *Geomorphology*, 1997, 18(3-4): 183-197.
- [21] 吴冰.砾石对坡面径流及入渗影响的试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [22] 张文博,吕俊容,谢永生等.不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J].水土保持学报,2020,34(03):49-54.
- [23] Cacuci D G, Ionescu-Bujor M. A comparative review of sensitivity and uncertainty analysis of large - scalesystems - II: Statistical methods [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2017, 147(3) : 204-217.
- [24] 赵紫岩.基于DOE和代理模型的结构优化设计方法及应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [25] Kinnell P I A. Runoff as factor influencing experimentally determined interrill erodibilities[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1993, 31(3): 333-342.
- [26] Huang Chihua. Empirical-analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(4): 982-990.
- [27] Zhang Xunchang, Nearing M A, Miller W P, et al. Modelling interrill sediment delivery[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(2): 438-444.
- [28] Zhang Guanghui, Wang Lili, Tang Keli, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1289-1299.
- [29] Zhang Fengbao, Wang Zhanli, Yang Mingyi. Validating and Improving Interrill Erosion Equations[J]. *Plos One*, 2014, 9(2).
- [30] 喻武,任德智,张鹏等.藏东南高寒土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J].水土保持学报,2021,35(06):76-82.
- [31] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [32] 马琳,王伟等.DOE全因子试验设计法优化托吡酯微丸制备工艺[J].中国新药杂志,2017,26(19):2347-2351.
- [33] Brakensiek D.L. and Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. In: J. Poesen and H. Lavee (editors), *Rock fragments in soils: surface dynamics*[J]. *Catena*, 1994,23: 99-110.
- [34] Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa[J]. *Catena*, 1994,23:87-97.
- [35] Poesen, J, et al. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. *Earth Surf. Process. Landforms*, 1990,15: 653-671.
- [36] 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.