

引用格式: 李以恒, 唐科明, 陈柯霖, 吴怀雨, 康艺洋. 长江上游地区土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响 [J]. 山地学报, 2023, 41(4): 469-477.

LI Yiheng, TANG Keming, CHEN Kelin, WU Huaiyu, KANG Yiyang. Effects of soil physicochemical properties on the erosion resistance of soil in the upper Yangtze River of China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 469-477.

长江上游地区土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响

李以恒, 唐科明*, 陈柯霖, 吴怀雨, 康艺洋

(四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: 长江上游地区土壤侵蚀严重, 其侵蚀阻力的影响因素尚不明确。分析土壤理化性质, 准确确定土壤侵蚀阻力, 将为当地水土流失治理提供依据。本文在长江上游水土流失重点区域选择 10 个样点采集坡耕地土壤, 测量土壤理化性质, 基于水槽试验测定土壤分离能力, 通过线性回归得到样点的土壤细沟可蚀性和临界剪切力, 采用统计分析方法确定土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响, 构建区域土壤侵蚀阻力与理化性质的定量关系, 并与采用 WEPP 模型的土壤侵蚀阻力值进行比较。结果表明: (1) 样点间土壤细沟可蚀性与临界剪切力差异较大。土壤细沟可蚀性为 $0.106 \sim 0.250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值为 $0.158 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 土壤临界剪切力为 $1.189 \sim 2.340 \text{ Pa}$, 均值为 1.597 Pa 。(2) 土壤细沟可蚀性与土壤极细砂含量和有机质含量呈显著相关关系, 细沟可蚀性随极细砂含量的增加呈线性形式增大, 随有机质含量的增大呈指数形式减小, 实测值与 WEPP 模型预测值相比偏小。(3) 土壤临界剪切力与土壤粉粒含量显著相关, 随粉粒含量的增加线性减小, 实测值与 WEPP 模型预测值相比偏大。研究结果可为长江上游地区坡耕地水土流失预报与治理提供数据支撑与理论依据。

关键词: 土壤侵蚀; 土壤理化性质; 细沟可蚀性; 临界剪切力; 长江上游

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

土壤侵蚀是指土壤在外营力作用下发生分离、搬运和沉积的过程^[1], 土壤抵抗外营力作用影响的能力被称为土壤侵蚀阻力^[2]。土壤细沟可蚀性和临界剪切力常用于表征土壤侵蚀阻力^[3]。土壤细沟可蚀性和临界剪切力与土壤容重^[4-5]、土壤有机质含量^[6-7]、土壤粉粒含量^[8]、土壤黏粒含量^[9]、以及极细砂含量^[10]等理化性质有关, 但由于研究采用的土壤侵蚀阻力影响因子不一样, 其研究结果表现出一定的地域性。

长江上游地区是中国水土流失最严重的地区之一, 土壤侵蚀影响区域经济与环境安全。由于坡耕

地面积分布广, 土壤侵蚀量大, 土壤养分流失严重, 影响长江上游地区粮食生产。土壤侵蚀产沙是长江河道泥沙的主要来源^[11], 侵蚀导致河道淤积, 引发洪涝灾害, 破坏区域经济发展以及生态安全。据估算, 长江上游四大土壤侵蚀重点地区(金沙江下游地区、嘉陵江中下游地区、嘉陵江上游地区以及三峡库区)坡耕地年土壤侵蚀面积约为 33.7 万 km^2 ^[12]。针对长江上游地区土壤侵蚀的研究, 大多针对特定区域^[13-14], 域内土壤理化性质差异性不显著, 导致构建的模型并不适用于域外地区, 不能从整体上把握长江上游全域土壤侵蚀状况及应对措施。

收稿日期(Received date): 2023-06-09; 改回日期(Accepted date): 2023-08-15

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41601288); 四川省大学生创新训练计划项目(S202210626100)。[National Nature Science Foundation of China (41601288); Sichuan Province College Student Innovation Training Program (S20220626100)]

作者简介(Biography): 李以恒(1997-), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 农业资源与环境。[LI Yiheng(1997-), male, born in Suizhou, Hubei province, M. Sc. candidate, research on agricultural resources and environment] E-mail: 874032150@qq.com.

* 通讯作者(Corresponding author): 唐科明(1981-), 男, 四川广安人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[TANG Keming(1981-), male, born in Guang'an, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: tangkeming1981@126.com

在长江上游进行全域选点,分析土壤理化性质,测量土壤侵蚀阻力,对水土流失治理,以及长江上游地区生态环境保护以及农业生产发展具有实际意义。本文以长江上游水土流失重点区域 10 个样点的坡耕地为研究对象,探究土壤理化性质对土壤细沟可蚀性、临界剪切力的影响,筛选对土壤侵蚀阻力影响显著的理化指标,建立长江上游地区土壤侵蚀阻力与土壤理化性质的关系模型。土壤侵蚀阻力影响因素研究,有助于深入了解土壤侵蚀机理。研究结果可为区域水土流失预报和治理提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点位于长江上游四大土壤侵蚀重点地区,如图 1 所示,区域内多山地丘陵,地表坡度大。该区域属亚热带季风气候,年降雨量 1000 mm 以上,降雨多集中在 5—10 月,暴雨频率高,为土壤侵蚀过程提供天然动力。该区域坡耕地面积广,土壤质地疏松易风化,地表覆盖度低,易受暴雨的冲击,大大加剧土壤侵蚀。

1.2 样品采集与制备

本研究在长江上游水土流失重点区域,分别采集了 10 个样点 7 种类型土样。样点基本信息如表 1 所示。

试验土壤均采集于坡耕地,采用“S”形布点,在选择采样点时考虑了坡度的相似性,在采样前,测量

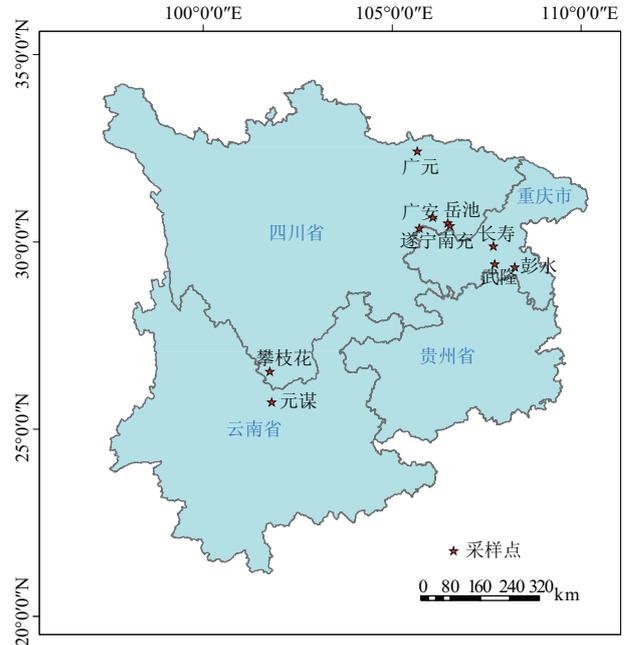


图 1 各采样点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites
(审图号:GS(2020)4619 号)

了样点土壤干容重。采集的土壤是表层 10 cm 以内的土壤,每个采样点采集 150 kg 土壤,封装标记后带回实验场地,自然风干,挑选出石头、植物根系等大颗粒杂质后,磨碎过 2 mm 筛。

测量风干土土壤含水率,将其装填至直径 10 cm,高度为 5 cm 的钢环。通过土壤含水率计算,确保钢环内土壤干容重与各样点原状土干容重相等。土样装填完成后,进行水分标准化处理,即将钢环浸于水中 12 h,保持液面在土壤表面 1 cm 以下,之后取出并静置于通风处 12 h,每个样点制作 30 个

表 1 样点的基本信息

Tab. 1 Basic information of sampling sites

| 重点水土流失区 | 样点位置 | 经度 | 纬度 | 土壤类型 | 土地利用类型 |
|----------|------|------------|-----------|------|--------|
| 金沙江下游地区 | 攀枝花 | 101°51'09" | 26°32'16" | 石灰土 | 果园地 |
| | 元谋 | 101°50'43' | 25°43'42" | 燥红土 | 玉米地 |
| 嘉陵江中下游地区 | 岳池 | 106°31'07' | 30°29'57' | 紫色土 | 玉米地 |
| | 广安 | 106°33'50' | 30°26'41" | 紫色土 | 玉米地 |
| | 南充 | 106°06'11" | 30°37'15" | 新积土 | 菜地 |
| 嘉陵江上游地区 | 遂宁 | 105°41'50" | 30°24'13" | 紫色土 | 玉米地 |
| | 广元 | 105°43'14" | 32°25'25" | 黄褐土 | 玉米地 |
| | 长寿 | 107°36'16" | 29°52'42" | 紫色土 | 玉米地 |
| 三峡库区 | 武隆 | 107°46'39" | 29°25'24" | 黄棕壤 | 玉米地 |
| | 彭水 | 108°15'01" | 29°20'58" | 黄壤 | 玉米地 |

环刀样本,用于水槽实验,以测定土壤分离能力。

1.3 土壤理化性质测量

土壤理化性质指标设定 3 个重复。土壤理化性质测量主要参照《土壤农化分析》^[15]。土壤容重在采样时用环刀法测量;机械组成采用吸管法测定,并按国际制^[16]分类法分类,其中黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm);极细砂含量(0.05~0.1mm);土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸外加热氧化的方法;阳离子交换量采用乙酸铵交换法。

1.4 土壤分离能力测定

土壤分离能力是评估土壤侵蚀过程的重要指标,它与土壤属性以及坡面径流参数密切相关^[17]。土壤分离能力采用水槽试验测定^[18],水槽尺寸为 5.0 m×0.4 m×0.3 m,水槽底端设有一个直径 10 cm,深度 5 cm 的圆形土样室,土壤放入后,其顶部与水槽底面齐平。通过滑轮调节水槽坡度,可调范围为 0°~20°。水槽系统安装了阀门组,用于调节流量。采用了 6 种不同的水动力条件,如表 2 所示。

表 2 水动力条件
Tab. 2 Hydrodynamic conditions

| 坡度/(°) | 流量/(L·s ⁻¹) | 剪切力/Pa |
|--------|-------------------------|--------|
| 5 | 0.25 | 1.10 |
| 5 | 1.00 | 3.53 |
| 10 | 1.50 | 7.04 |
| 15 | 1.50 | 9.14 |
| 20 | 1.50 | 11.43 |
| 20 | 1.50 | 15.00 |

试验时,将水槽坡度、流量调节到设计值,水流稳定后将制备的土样放入样品室冲刷,当土样深度减少 2 cm 时,取出土样并记录时间,将冲刷后的样品烘干、称重,计算土壤分离能力,计算公式如下:

$$D_c = \frac{W_s}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中, D_c 为土壤分离能力[$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; W_s 为 t 时间内土壤分离质量(kg); A 为土壤底面面积(m^2); t 为冲刷时间(s)。每个水流剪切力下冲刷 5 次,取均值。

1.5 数据处理

WEPP (Water Erosion Prediction Project) 模型是由美国农业部组织研发的一种土壤侵蚀模型,土壤细沟可蚀性与临界剪切力是该模型的核心参数^[19],

二者统称为土壤侵蚀阻力。在 WEPP 模型中,土壤细沟可蚀性与临界剪切力可通过土壤分离能力与水流剪切力线性拟合得到,即在每个水流剪切力下测得对应土壤分离能力,将水流剪切力和土壤分离能力按照式(2)拟合,即可得到土壤细沟可蚀性与临界剪切力:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (2)$$

式中, K_r 为细沟可蚀性($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); τ 为水流剪切力(Pa); τ_c 为土壤临界剪切力(Pa)。

WEPP 模型中,土壤细沟可蚀性 K_r 可由极细砂含量和有机质含量模拟^[17],当土壤中砂粒含量大于等于 30% 时, K_r 计算公式如下:

$$K_r = 0.00197 + 0.03VFS + 0.03863e^{-184SOM} \quad (3)$$

式中, VFS 为极细砂含量(%); SOM 为有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

当土壤中砂粒含量小于 30% 时,土壤细沟可蚀性通过黏粒含量来计算:

$$K_r = 0.0069 + 0.134e^{-20Clay} \quad (4)$$

式中, $Clay$ 为黏粒含量(%).

WEPP 模型中,当土壤砂粒含量大于或等于 30% 时,临界剪切力 τ_c 通过极细砂含量以及黏粒含量表示^[17]:

$$\tau_c = 2.67 + 6.5Clay - 5.8VFS \quad (5)$$

当土壤砂粒含量小于 30% 时,土壤临界剪切力则表示为:

$$\tau_c = 3.5 \quad (6)$$

通过测定各样点土壤在不同的水流剪切力下的土壤分离能力,并根据式(2)进行线性拟合,即可得到各样点的土壤细沟可蚀性、临界剪切力。通过相关分析和回归分析等方法研究土壤理化性质对土壤细沟可蚀性、临界剪切力的影响,通过建立土壤侵蚀阻力与土壤理化性质的定量关系,并与 WEPP 模型结果做对比,以分析 WEPP 模型在长江上游地区的适用性。本文数据统计整理及部分图表采用 Excel 软件,相关性分析采用 SPSS24 软件,制图采用 Origin2021 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

本试验测定了长江上游地区 10 个样点土壤理化性质,如表 3 所示。结果显示,极细砂含量均值为

表 3 各样点土壤理化性质

Tab. 3 Soil physical and chemical properties at sampling sites

| 地区 | VFS/% | Clay/% | Silt/% | Sand/% | Bd/ ($g \cdot cm^{-3}$) | D50/ μm | SOM/ ($g \cdot kg^{-1}$) | CEC/ ($cmol \cdot kg^{-1}$) |
|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 攀枝花 | 17.22 ± 1.45 | 8.89 ± 0.33 | 68.87 ± 0.51 | 22.25 ± 0.49 | 1.42 ± 0.02 | 27.03 ± 0.85 | 12.74 ± 1.37 | 9.63 ± 0.14 |
| 元谋 | 17.16 ± 1.14 | 20.39 ± 0.29 | 57.42 ± 0.54 | 22.19 ± 0.28 | 1.41 ± 0.03 | 26.96 ± 0.29 | 43.52 ± 3.15 | 11.67 ± 0.23 |
| 岳池 | 11.94 ± 2.52 | 30.36 ± 0.67 | 52.56 ± 0.75 | 17.08 ± 1.39 | 1.37 ± 0.01 | 8.81 ± 0.71 | 14.14 ± 0.50 | 10.96 ± 0.25 |
| 广安 | 17.16 ± 0.97 | 18.04 ± 0.43 | 59.88 ± 0.36 | 22.08 ± 0.14 | 1.29 ± 0.04 | 23.93 ± 0.93 | 10.48 ± 0.43 | 11.85 ± 0.25 |
| 南充 | 23.21 ± 2.70 | 6.60 ± 0.08 | 65.30 ± 0.51 | 28.10 ± 0.57 | 1.36 ± 0.01 | 36.20 ± 0.70 | 8.92 ± 0.93 | 13.14 ± 0.38 |
| 遂宁 | 3.01 ± 0.78 | 17.08 ± 0.22 | 74.99 ± 0.28 | 7.93 ± 0.08 | 1.32 ± 0.04 | 11.68 ± 0.08 | 15.41 ± 1.56 | 11.42 ± 0.07 |
| 广元 | 14.08 ± 0.82 | 11.09 ± 0.24 | 69.78 ± 0.57 | 19.12 ± 0.41 | 1.36 ± 0.03 | 23.44 ± 0.75 | 10.74 ± 1.85 | 11.45 ± 0.31 |
| 长寿 | 10.58 ± 1.23 | 10.98 ± 0.24 | 51.62 ± 0.57 | 37.40 ± 0.33 | 1.30 ± 0.05 | 22.88 ± 0.57 | 10.76 ± 0.22 | 6.92 ± 0.05 |
| 武隆 | 8.93 ± 1.82 | 29.53 ± 0.37 | 56.60 ± 0.50 | 13.87 ± 0.85 | 1.33 ± 0.06 | 9.38 ± 0.24 | 14.49 ± 0.59 | 6.90 ± 0.03 |
| 彭水 | 4.97 ± 0.50 | 24.29 ± 0.51 | 65.75 ± 0.94 | 9.96 ± 1.04 | 1.31 ± 0.05 | 13.31 ± 0.22 | 13.70 ± 0.51 | 6.55 ± 0.03 |

注: CEC 为阳离子交换量。

12.83%, 遂宁样点最低, 南充样点地区最高; 土壤机械组成主要以粉粒为主, 其中遂宁样点地区粉粒含量最高, 达到 75%, 长寿样点地区粉粒含量最低为 51.6%; 岳池样点黏粒含量最高达 30.4%, 南充样点黏粒含量最低为 6.6%; 土壤容重变化范围为 1.29 ~ 1.42 $g \cdot cm^{-3}$; 中值粒径最高的样点是南充地区, 最低的是岳池地区; 除元谋地区外, 其他样点土壤有机质含量均低于 20.00 $g \cdot kg^{-1}$, 元谋样点地区有机质含量最高达 43.52 $g \cdot kg^{-1}$; 阳离子交换量变化范围为 6.55 ~ 13.14 $cmol \cdot kg^{-1}$, 均值为 10.05 $cmol \cdot kg^{-1}$, 其中南充样点地区最高, 武隆样点地区最低。

2.2 土壤侵蚀阻力

在进行线性拟合后, 得到各样点土壤分离能力与水流剪切力之间的关系, 并计算得到各样点土壤细沟可蚀性和临界剪切力, 如表 4 所示。各样点土壤细沟可蚀性变化范围为 0.106 ~ 0.250 $s \cdot m^{-1}$, 均值为 0.158 $s \cdot m^{-1}$, 其中武隆地区土壤细沟可蚀性最低, 广元地区土壤细沟可蚀性最高; 各样点土壤临界剪切力变化范围为 1.189 ~ 2.340 Pa, 均值为 1.597 Pa, 其中武隆地区土壤临界剪切力最大, 南充地区土壤临界剪切力最小。

2.3 土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响

2.3.1 土壤侵蚀阻力与土壤理化性质的相关性分析

相关性分析显示, 土壤细沟可蚀性与土壤极

表 4 各地区土壤细沟可蚀性与临界剪切力

Tab. 4 Soil rill erodibility and critical shear stress at sampling sites

| 地区 | 回归方程 | $K_r/(s \cdot m^{-1})$ | τ_c/Pa |
|-----|---------------------------|------------------------|-------------|
| 攀枝花 | $D_c = 0.184\tau - 0.231$ | 0.184 | 1.250 |
| 元谋 | $D_c = 0.124\tau - 0.235$ | 0.124 | 1.895 |
| 岳池 | $D_c = 0.136\tau - 0.230$ | 0.136 | 1.691 |
| 广安 | $D_c = 0.215\tau - 0.347$ | 0.215 | 1.614 |
| 南充 | $D_c = 0.175\tau - 0.208$ | 0.175 | 1.189 |
| 遂宁 | $D_c = 0.112\tau - 0.151$ | 0.112 | 1.348 |
| 广元 | $D_c = 0.250\tau - 0.358$ | 0.250 | 1.432 |
| 长寿 | $D_c = 0.123\tau - 0.242$ | 0.123 | 1.967 |
| 武隆 | $D_c = 0.106\tau - 0.248$ | 0.106 | 2.340 |
| 彭水 | $D_c = 0.157\tau - 0.196$ | 0.157 | 1.248 |

细砂含量呈显著正相关关系, 与有机质含量呈显著负相关关系。细沟可蚀性与黏粒、粉粒、砂粒、容重、中值粒径以及阳离子交换量无统计意义上的相关性; 土壤临界剪切力与粉粒含量呈显著正相关关系, 与其余指标无统计意义上的相关性, 如表 5 所示。

2.3.2 土壤侵蚀阻力与土壤理化性质的定量关系

根据相关性分析结果, 土壤细沟可蚀性可由土壤极细砂含量、土壤有机质含量模拟, 二者定量关系如下:

表 5 各采样点土壤侵蚀阻力与理化性质的相关性

Tab. 5 Correlation between soil erosion resistance and physicochemical properties at each sampling site

| 侵蚀阻力指标 | VFS | Clay | Silt | Sand | Bd | D50 | SOM | CEC |
|----------|---------|--------|----------|-------|-------|--------|----------|--------|
| K_r | 0.648 * | -0.382 | 0.394 | 0.285 | 0.122 | 0.564 | -0.709 * | 0.442 |
| τ_c | -0.273 | 0.479 | -0.709 * | 0.042 | 0.116 | -0.455 | 0.406 | -0.236 |

注: * 表示显著相关($P < 0.05$)。

$$K_r = 0.068 + 0.003VFS + 0.185e^{-0.094SOM}$$

$$(R^2 = 0.414) \quad (P < 0.05) \quad (7)$$

土壤临界剪切力可以通过土壤粉粒含量测定,通过回归分析得到临界剪切力与土壤理化性质的定量关系如下:

$$\tau_c = 3.819 - 0.0257Silt$$

$$(R^2 = 0.547) \quad (P < 0.05) \quad (8)$$

式中, $Silt$ 为粉粒含量(%)。

2.4 土壤侵蚀阻力实测值与 WEPP 模型模拟值对比

2.4.1 土壤细沟可蚀性实测值与 WEPP 模型模拟值对比

将本实验测得的土壤理化性质代入式(3)、(4),可以得到各地区基于 WEPP 模型的土壤细沟可蚀性模拟值,将 WEPP 模型模拟值与本研究实测值对比,如图 2 所示。长江上游地区 WEPP 模型细

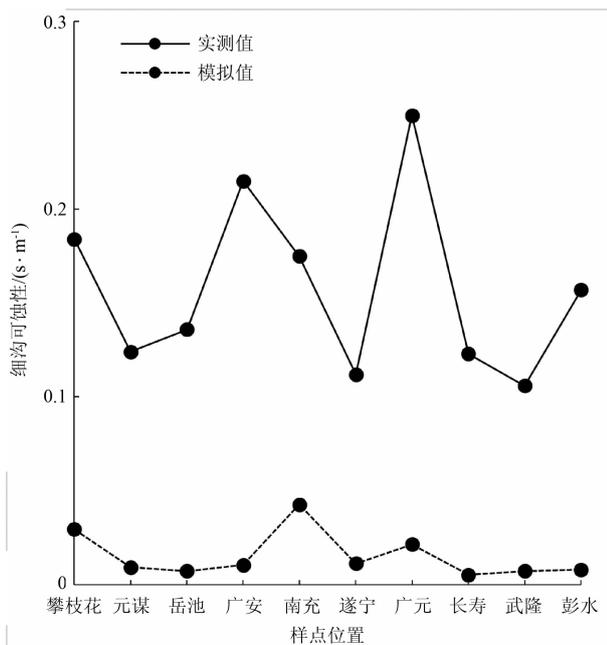


图 2 土壤细沟可蚀性实测值与 WEPP 模型模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured values of rill erodibility and predicted values of WEPP model

沟可蚀性模拟值远小于实测值。WEPP 模型细沟可蚀性模拟值变化范围为 0.005 ~ 0.043 $s \cdot m^{-1}$,南充样点地区细沟可蚀性最高,长寿样点地区最低。长江上游地区土壤的细沟可蚀性实测值变化范围为 0.106 ~ 0.250 $s \cdot m^{-1}$,约为 WEPP 模型模拟值的 14 倍。

2.4.2 土壤临界剪切力实测值与 WEPP 模型值对比

将测得的土壤理化性质代入式(5)、式(6)可以得到各样点土壤临界剪切力的 WEPP 模型模拟值,将 WEPP 模型模拟值与本研究实测值对比,如图 3 所示。WEPP 模型临界剪切力模拟值均大于本实验实测值。WEPP 模型临界剪切力估算值除长寿样点地区外均为 3.5 Pa,长寿样点地区临界剪切力估算值为 2.77 Pa。长江上游地区土壤临界剪切力实测值范围为 1.189 ~ 2.340 Pa,约为 WEPP 模型模拟值的 0.5 倍。

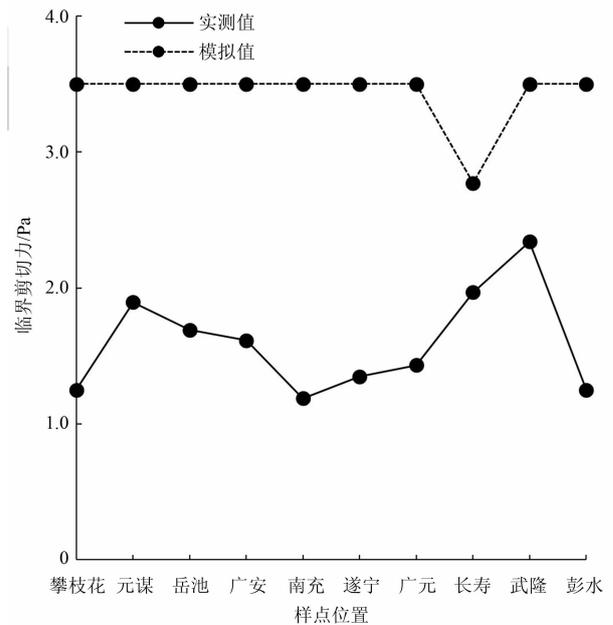


图 3 临界剪切力实测值与 WEPP 模型估算值对比

Fig. 3 Comparison of measured values of critical shear stress and predicted values of WEPP model

3 讨论

3.1 土壤理化性质对土壤细沟可蚀性的影响

相关性研究表明,土壤细沟可蚀性与土壤极细砂含量呈显著正相关关系,与有机质含量呈显著负相关关系。先前有研究^[20]指出,土壤机械组成与土壤有机质是影响细沟可蚀性的主要因素。土壤极细砂含量指粒径范围为0.05~0.10 mm的土壤细小颗粒含量,在雨水等外力作用下容易从土壤中剥离,因此较高的土壤极细砂含量意味着土壤分离能力较强,进而具有较高的细沟可蚀性。土壤有机质是评估土壤肥力大小的重要指标,通过促进土壤水稳性团聚体的形成,从而增强土壤结构的稳定性^[21],有学者^[22]认为土壤可蚀性与土壤团聚体的水稳性密切相关。因此,土壤有机质可能通过增加土壤水稳性团聚体含量和加强土壤团粒间的粘结作用等途径降低土壤可蚀性,这与陈爱民^[23]等得出结论一致。本研究中,长江上游地区坡耕地土壤细沟可蚀性实测值远大于WEPP细沟可蚀性模拟值,这可能是因为WEPP模型数据来源于径流小区的实测结果,径流中携有泥沙颗粒,水流能量一部分消耗于泥沙输移,因此,所测得的土壤细沟可蚀性较低。而本实验采用的是清水水流,且实验土样面积较小,水流流经土样时间较短,水流能量主要用于土壤分离,因此实际测得的细沟可蚀性大于WEPP模型模拟值。Geng^[24]等在研究黄土高原土壤细沟可蚀性变化范围为0.0005~0.21 s·m⁻¹,与本实验结果相差不大。WEPP模型土壤细沟可蚀性模拟方程采用的土壤理化指标与本文正好一致。这充分说明,WEPP模型中土壤细沟可蚀性模拟方程经过校正后能够在长江上游地区推广应用。

3.2 土壤理化性质对土壤临界剪切力的影响

相关性研究表明,土壤临界剪切力与土壤粉粒含量呈显著负相关关系,有研究指出^[13]三峡库区土壤临界剪切力与土壤理化性质无显著相关关系,这可能与采样点区域分布以及样点类型有关,因此需要使用更大尺度范围进行采样。有研究者^[25]在研究下水道沉积土壤时发现土壤临界剪切力随土壤粉粒含量呈正相关关系,与本文结论相反,这可能与实验方法以及土壤类型有关。本研究采用土壤主要为粉质土壤,但土壤机械组成变化差异较大,土壤有机

质含量变化范围为8.9%~43.5%,说明土壤质地虽主要为粉质土壤,但各样点土壤理化性质变化较大,能够体现理化性质的差异及其对土壤侵蚀阻力的影响。而下水道泥沙淤积,长期受水流冲刷,土壤颗粒间具有较强的作用力,与本研究土壤类型具有较大的差异。此外,长江上游地区坡耕地土壤临界剪切力实测值小于WEPP模型估算值,造成这一现象的原因可能是WEPP模型中试验土壤均在径流小区内进行,土壤结构未遭受破坏,整体性较强。而本研究中,试验土壤经加工处理后,土壤结构被破坏,土壤颗粒间粘结力较小,抗蚀性能降低,从而导致土壤临界剪切力减小。另外,Geng^[26]等的研究结果表明,中国东部陡坡耕地土壤临界剪切力范围为0.43~4.75 Pa,本试验结果处于该范围之内。

4 结论

本研究选择了长江上游水土流失重点地区10个样点,计算了各样点土壤侵蚀阻力指标(土壤细沟可蚀性、临界剪切力),以探究土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响。主要结论如下:

(1)长江上游地区各样点土壤细沟可蚀性变化范围为0.106~0.250 s·m⁻¹,均值为0.158 s·m⁻¹。其中广元样点的细沟可蚀性最高,武隆样点最低。土壤极细砂含量与土壤有机质对土壤细沟可蚀性具有显著影响,细沟可蚀性与极细砂含量呈显著负相关关系,与土壤有机质呈显著正相关关系($P < 0.05$),土壤细沟可蚀性可用土壤极细砂含量和有机质含量模拟。WEPP模型土壤细沟可蚀性模拟值普遍低于本研究实测值。

(2)长江上游样点地区土壤临界剪切力范围为1.189~2.340 Pa,均值1.597 Pa,其中,武隆样点的临界剪切力最大,南充样点最小。土壤粉粒含量对土壤临界剪切力具有显著影响,土壤临界剪切力与土壤粉粒含量呈显著负相关关系($P < 0.05$)。土壤临界剪切力可用土壤粉粒含量模拟。WEPP模型临界剪切力模拟值高于本研究实测值。

参考文献(References)

- [1] 张光辉,卫海燕,刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 58-61. [ZHANG Guanghui, WEI Haiyan, LIU Baoyuan. Study on hydro-dynamic properties of

- overland flow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(1): 58–61] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2001.01.016
- [2] 郑粉莉, 唐克丽, 张科利, 等. 自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变[J]. *生态学报*, 1995, **15**(3): 251–259. [ZHENG Fenli, TANG Keli, ZHANG Keli, et al. Relationship of eco-environmental change and natural erosion and man-made accelerated erosion [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(3): 251–259] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.1995.03.004
- [3] GUO Tian, SRIVASTAVA A, FLANAGAN D C. Improving and calibrating channel erosion simulation in the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **291**: 112616. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112616
- [4] 程圣东, 李占斌, 李强. 干热河谷地区土壤物理特性对土壤侵蚀的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, **19**(5): 38–41. [CHENG Shengdong, LI Zhanbin, LI Qiang. Effect of soil physical properties to soil erosion in dry and hot valley of Jinshajiang River [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, **19**(5): 38–41] DOI: 1672-643X(2008)05-0038
- [5] KNAPEN A, POESEN J, DEBAETS S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **94**(2): 425–440. DOI: 10.1016/j.still.2006.09.005
- [6] WANG Junguang, FENG Shuyue, NI Shimin, et al. Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of southeast China [J]. *Catena*, 2019, **183**: 104235. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104235
- [7] 王长燕, 郁耀闯. 黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟可蚀性季节变化研究[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(8): 101–108. [WANG Changyan, YU Yaochuang. Seasonal variations of soil rill erodibility under different types of grass in loess hilly region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(8): 101–108] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.014
- [8] LI Zhenwei, ZHANG Guanghui, GENG Ren, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, **129**: 248–257. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.11.002
- [9] WANG Hao, ZHANG Guanghui, LI Ningning, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2019, **174**: 24–35. DOI: 10.1016/j.catena.2018.11.003
- [10] GILLEY J E, ELLIOT W J, LAFLEN J M, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, **142**: 251–271. DOI: 10.1016/0022-1694(93)90013-y
- [11] 张信宝, 贺秀斌. 长江上游坡耕地整治成效分析[J]. *人民长江*, 2010, **41**(13): 21–23. [ZHANG Xinbao, HE Xiubin. Achievement of slope farm land regulation in upper Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2010, **41**(13): 21–23] DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2010.13.005
- [12] 顾朝军, 朱永清, 黄立文, 等. 长江流域水土流失变化及影响因素分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, **32**(S1): 24–29. [GU Chaojun, ZHU Yongqing, HUANG Liwen, et al. Analysis of soil erosion changes and influencing factors in the Yangtze River Basin [J]. *China Flood and Drought Management*, 2022, **32**(S1): 24–29] DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022571
- [13] 张靖宜. 三峡库区坡耕地土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020: 23–28. [ZHANG Jinyi. Effects of soil physical and chemical properties on soil erosion resistance of sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020: 23–28] DOI: 10.27345/d.cnki.gsnvu.2020.000988
- [14] 洪焕. 三峡库区消落带(香溪郭家坝段)时空变化对土壤分离的影响因素研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020: 13–16. [HONG Huan. A study on the influence factors of spatial and temporal variations on the soil detachment of the Three Gorges Reservoir area [D]. Yichang: Three Gorges University, 2020: 13–16] DOI: 10.27270/d.cnki.gsxau.2020.000470
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–33. [BAO Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30–33]
- [16] 何海龙, 齐雁冰, 吕家珑, 等. 中国土壤质地分类系统的发展与建议修订方案[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, **40**(3): 501–510. [HE Hailong, QI Yanbing, LYU Jialong, et al. Development and revision of the Chinese soil texture classification system [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, **40**(3): 501–510] DOI: 10.13254/j.jare.2022.0854
- [17] 孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(11): 57–65. [SUN Baoyang, WU Zhiguang, LI Zhanbin, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(11): 57–65] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.007
- [18] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(6): 882–886. [ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan, ZHANG Keli. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on sloped land [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(6): 882–886] DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2002.06.015
- [19] LANE L J, NEARING M A. USDA-water erosion prediction project: Hillslope profile model documentation [M]. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1989: 115–121.
- [20] 何周窃, 苏正安, 王勇, 等. 干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(3): 8–

13. [HE Zhouyao, SU Zheng'an, WANG Yong, et al. Erodibility and main influencing factors of soil rill in gully development area of dry-hot valley [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(3): 8–13] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.03.002
- [21] 张淑娟, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库消落带土壤团聚体微结构变化特征[J]. *山地学报*, 2020, **38**(3): 360–370. [ZHANG Shujuan, HE Xiubin, BAO Yuhai, et al. Change features of soil aggregate microstructure in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(3): 360–370] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000516
- [22] 梁淑敏, 谢瑞芝, 汤永禄, 等. 不同耕作措施对成都平原稻麦轮作区土壤蓄水抗蚀性及产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, **28**(2): 199–205. [LIANG Shumin, XIE Ruizhi, TANG Yonglu, et al. Effect of different tillage systems on the corrosion resistance and water storage of soil and crop yield under rice-wheat rotation in Chengdu plain [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, **28**(2): 199–205] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7216.2014.02.012
- [23] 陈爱民, 严思维, 林勇明, 等. 地震灾区生态治理初期土壤抗蚀性特征——以汶川地震典型区为例[J]. *山地学报*, 2018, **36**(1): 74–82. [CHEN Aimin, YAN Siwei, LIN Yongming, et al. Characteristics of soil anti-erodibility at the initial stage of ecological restoration in the earthquake affected regions [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(1): 74–82] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000302
- [24] GENG Ren, ZHANG Guanghui, MA Qianhong, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China [J]. *Catena*, 2017, **152**: 18–28. DOI: 10.1016/j.catena.2017.01.002
- [25] TANG Yangbo, ZHU D Z, VANDUIN B. Erosion on cohesive deposition in storm sewers [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, **146**(12): 04020136. DOI: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001824
- [26] GENG Ren, ZHANG Guanghui, MA Qianhong, et al. Effects of landscape positions on soil resistance to rill erosion in a small catchment on the Loess Plateau [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, **160**: 95–108. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.001

Effects of Soil Physicochemical Properties on the Erosion Resistance of Soil in the Upper Yangtze River of China

LI Yiheng, TANG Keming*, CHEN Kelin, WU Huaiyu, KANG Yiyang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agriculture University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract: Although soil erosion in the upper Yangtze River is extremely serious, the influencing factors of inherent soil resistance to soil erosion had been kept unclear, which prevented local authorities from efficient local soil-water loss control. Analyzing the influence of soil physicochemical properties on soil erosion resistance in the region can lead to accurate determination of soil erosion resistance and provide an instruction for water and soil conservation campaign.

In this study, 10 sites on hillslope farmland were selected for soil sampling representative of the key soil and water loss areas in the upper Yangtze River of China, following by lab tests of soil physicochemical properties; it conducted in-door flume experiments for measurement of soil detachment capacity; then it obtained soil rill erodibility and critical shear stress at each sampling site by linear regression. Statistical analysis was used to quantify the effect of soil physicochemical properties on soil erodibility; then a region-scale quantitative correlation between soil erosion resistance and physicochemical properties was build suitable for the upper Yangtze River and calibrated with simulations obtained from a WEPP model.

This research had the following results. (1) Soil rill erodibility and critical shear stress varied considerably according to sampling sites. The soil rill erodibility ranged from 0.106 to 0.250 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ at sampling sites, with a

mean of $0.158 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The critical shear stress ranged from 1.189 to 2.340 Pa at sampling sites, with a mean of 1.597 Pa. (2) Soil rill erodibility was significantly correlated with the content of very-fine-sand as well as organic matter in the soil. Measured soil rill erodibility increased linearly with the increase of very-fine-sand content and decreased exponentially with the increase of soil organic matter content, which were lower than the predicted values obtained from a WEPP model. (3) Measured soil critical shear stress was significantly correlated with soil silt content and decreased linearly with the increase of soil silt content, which was larger than the predicted values by the WEPP model.

This research can provide data support and theoretical basis for soil and water loss prediction and control of sloping farmland in the upper Yangtze River of China.

Key words: soil erosion; soil physicochemical properties; rill erodibility; critical shear stress; the upper Yangtze River

(责任编辑 钟雨倩)