

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.04.020 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.04.020

朱启明, 齐小倩, 刘俊娥, 等. 黄土高原土壤细沟输沙能力对坡度和流量的响应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):168-176.

ZHU Qiming, QI Xiaoqian, LIU Jun'e, et al. Response of Rill Sediment Transport Capacity to Slope Gradient and Flow Rate for Soils on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):168-176.

## 黄土高原土壤细沟输沙能力对坡度和流量的响应

朱启明<sup>1</sup>, 齐小倩<sup>1</sup>, 刘俊娥<sup>1,2</sup>, 程西科<sup>1</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>, 周正朝<sup>1,2</sup>

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 榆林沙漠黄土过渡带生态与环境陕西省野外科学观测研究站, 西安 710119)

**摘要:** [目的] 为揭示细沟输沙能力随坡度和流量的变化规律, 完善泥沙输移理论和构建土壤侵蚀预测模型。[方法] 通过室内水槽加沙试验, 在5个坡度(9°、12°、15°、18°和21°)和4个流量(5、7、9、11 L/min)组合条件下, 测定黄土高原4种土壤(砂土、沙黄土、黄绵土和黑垆土)的细沟输沙能力, 分析细沟输沙能力随坡度和流量的变化趋势, 构建细沟输沙能力的预测模型。[结果] 1) 4种土壤的细沟输沙能力均随坡度或流量的增加而增加。在坡度为15°或流量为7、9、11 L/min下, 不同土壤间的细沟输沙能力存在显著差异( $p < 0.05$ )。2) 4种土壤的细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)间的增加速率呈非线性变化趋势。3) 不同坡度(或流量)下, 4种土壤的细沟输沙能力对流量(或坡度)的响应关系均可用幂函数较好地描述( $R^2$ 为0.713~1.000)。基于细沟输沙能力受到坡度与流量间耦合效应的影响, 构建基于坡度和流量的二元指数函数型的细沟输沙能力预测模型, 且模型的预测结果均较高( $R^2$ 为0.839~0.945)。[结论] 黄土高原土壤的细沟输沙能力对坡度和流量响应关系复杂, 并揭示幂函数模型在表征细沟输沙能力对坡度或流量的响应关系具有优越性。

**关键词:** 输沙能力; 细沟侵蚀; 黄土高原; 坡度; 流量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0168-09

## Response of Rill Sediment Transport Capacity to Slope Gradient and Flow Rate for Soils on the Loess Plateau

ZHU Qiming<sup>1</sup>, QI Xiaoqian<sup>1</sup>, LIU Jun'e<sup>1,2</sup>, CHENG Xike<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhengchao<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Shaanxi Observation and Research Station for Ecology and Environment of Desert-Loess Zone at Yulin, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study was to reveal the variation patterns of rill sediment transport capacity with slope gradient and flow rate, improve the sediment transport theory, and construct soil erosion prediction models. [Methods] Through indoor flume tests with added soil, the rill sediment transport capacity of four typical soils on the Loess Plateau (silty clay, sandy loam, silty loam and silt) was measured under combinations of five slope gradients (9°, 12°, 15°, 18° and 21°) and four flow rates (5, 7, 9 and 11 L/min). The trends in rill sediment transport capacity with slope gradient and flow rate for four soils were analyzed, and prediction models for rill sediment transport capacity were developed. [Results] 1) The rill sediment transport capacity of the four soils increased with increasing slope gradient or flow rate. At a slope of 15° or under flow rates of 7, 9 and 11 L/min, significant differences were observed in the rill sediment transport capacity among the four soil types ( $p < 0.05$ ). 2) The rate of increase in rill sediment transport capacity among the four soil types exhibited a nonlinear trend between adjacent slope gradients (or flow rates). 3) The response of rill sediment transport capacity to slope gradient (or flow rate) for different soils under varying slope gradients (or flow rates) could be well described by power functions ( $R^2$ : 0.713-1.000). Given that rill sediment transport capacity was

收稿日期: 2025-01-14

修回日期: 2025-03-27

录用日期: 2025-04-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-23

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(42077058, 42277320, 42377322); 中央高校基本科研业务费项目(GK202309005); 陕西省重点研发计划项目(2024SF-ZDCYL-05-10)

第一作者: 朱启明(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: qimingzhu@snnu.edu.cn

通信作者: 刘俊娥(1987—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: liujune5@snnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

influenced by the coupling effect between slope gradient and flow rate, binary exponential function-based prediction models for rill sediment transport capacity were developed for the four soils, with both slope gradient and flow rate being incorporated as variables. The constructed models all exhibited high predictive accuracy ( $R^2$ : 0.839-0.945). [Conclusion] The rill sediment transport capacity exhibits complex response to slope gradient and flow rate for four soils on the Loess Plateau. The power function model demonstrates superiority in characterizing the response of rill sediment transport capacity to slope gradient or flow rate.

**Keywords:** sediment transport capacity; rill erosion; the Loess Plateau; slope gradient; flow rate

**Received:** 2025-01-14

**Revised:** 2025-03-27

**Accepted:** 2025-04-18

**Online**(www.cnki.net): 2025-05-23

土壤侵蚀造成土壤退化、土地生产力下降,同时,侵蚀泥沙的迁移也对流域下游的生态环境安全和社会经济可持续发展构成严峻威胁<sup>[1]</sup>。黄土高原地形破碎,土质疏松,人为破坏干扰严重,加之夏季侵蚀性降雨频发,是全球土壤侵蚀问题最为严重的地区<sup>[2]</sup>。细沟侵蚀作为黄土高原地区主要的侵蚀类型,不仅是该区坡面侵蚀的主要产沙源,而且为侵蚀物质的后续搬运提供传输路径<sup>[3]</sup>。据统计<sup>[4]</sup>,细沟侵蚀造成的土壤侵蚀量在黄土高原坡面总侵蚀量的占比高达70%以上。深入探究黄土高原细沟侵蚀过程及其影响因素,对防治该区水土流失具有至关重要的理论意义。

土壤侵蚀可分为土壤分离、泥沙输沙和泥沙沉积3个子过程。在土壤侵蚀模型中,输沙能力被视作判定土壤分离和泥沙沉积过程发生与否的关键控制参数<sup>[5]</sup>。输沙能力指在特定坡度和流量条件下,清水所能挟带的最大泥沙通量<sup>[6]</sup>。仅当水流含沙量低于或超过输沙能力时,土壤分离或泥沙沉积方被假定发生<sup>[7]</sup>。土壤属性和水动力学特征是影响细沟输沙能力的关键要素。坡度和流量作为最基础的水动力学因子,其对输沙能力影响的相关研究已取得丰硕成果。坡度和流量均可显著提高径流的流速和动能,增加水流挟带的泥沙数量<sup>[8]</sup>。YAO等<sup>[9]</sup>研究指出,黄土高原耕地细沟输沙能力随坡度或流量的增加而增加,且坡度对细沟输沙能力的影响较流量更为显著;LIU等<sup>[10]</sup>研究发现,坡度和流量显著影响细沟输沙能力,但其影响强弱程度受到土壤类型的制约;孟书翰等<sup>[11]</sup>研究发现,黄土高原黄绵土细沟输沙能力随流量呈近乎等比例增长趋势,随着坡度增加,其增长趋势逐渐趋于平缓;ZHAO等<sup>[12]</sup>研究表明,当流量 $>0.0002\text{ m}^2/\text{s}$ 时,3种黄土高原典型土壤的细沟输沙能力随坡度的增加趋势均显著增强。与此同时,基于坡度或流量建立的细沟输沙能力模型多样,以线性、指数函数或幂函数形式为主。例如,师宏强等<sup>[13]</sup>建立基于流量的幂函数模型和基于坡度的指数函数模型,分别用于预测不同坡度和不同流

量下的黄绵土坡面流输沙能力;刘晨光等<sup>[14]</sup>分别依据坡度和流量,构建水流输沙能力的幂函数预测模型;FENG等<sup>[15]</sup>针对黄土高原砂质坡面,在不同流量和不同坡度条件下,分别提出基于坡度的线性形式和基于流量的指数函数形式的输沙能力预测模型;XIAO等<sup>[16]</sup>研究发现,在不同坡度(或流量)下,黄绵土细沟输沙能力与流量(或坡度)呈显著的线性函数关系;王莎等<sup>[17]</sup>研究指出,幂函数和指数形式的模型在预测陕北地区黄绵土的细沟输沙能力时,均表现出较好的适用性;赵海滨等<sup>[18]</sup>研究发现,黄土坡面输沙率随着流量表现出“缓—陡—缓—陡”的非线性增加过程。

尽管诸多研究已证实黄土高原土壤细沟输沙能力与坡度或流量间存在着显著的响应关系,但由于坡度、流量、供试土壤和人工加沙方式等关键试验条件存在着客观差异,关于二者的具体函数关系尚未形成共识。因此,不一致性也限制对泥沙输移过程的理解和土壤侵蚀预测模型的构建。现有研究多局限于缓坡条件,或仅采用非黏性沙或单一土壤类型作为研究对象,缺乏对陡坡条件和多类型黏性土壤的细沟输沙能力随坡度或流量变化规律的同步观测与深入探究<sup>[5,14]</sup>。鉴于此,为进一步明确黄土高原不同质地土壤细沟输沙能力随坡度和流量的响应关系,拟选取4种不同质地土壤,采用室内水槽供沙试验,深入探究细沟输沙能力随坡度和流量的变化规律,以期构建细沟输沙能力预测模型。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

选取4种黄土高原典型土壤为供试土壤,即砂土、沙黄土、黄绵土和黑垆土。其中,砂土(38.80°N, 110.36°E)和沙黄土(38.79°N, 110.37°E)均采自神木市,黄绵土和黑垆土则分别源自延安安塞区(36.80°N, 109.28°E)和永寿县(34.84°N, 108.13°E)。取样点均位于黄土高原丘陵沟壑区内,该地区土壤水蚀频发且沟壑密布<sup>[19]</sup>,具备开展泥沙输移研究的典型特征。供试土壤均取自农耕地表层0~20 cm,土壤质地依次

为砂壤土、粉砂质壤土、粉壤土和粉土。土样均通过 7 mm 孔径土筛,以筛除石块、凋落物、根系等杂质,并于通风处自然风干备用。采用激光粒度仪测定土壤

的机械组成和中值粒径,通过环刀法<sup>[20]</sup>测定土壤体积质量,通过重铬酸钾外加热法<sup>[20]</sup>测定有机质质量分数。试验土壤的理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the tested soils

土壤类型	采样点	黏粒 ( $<0.002$ mm)/%	粉粒 ( $0.002\sim$ $0.05$ mm)/%	砂粒 ( $0.05\sim$ $2$ mm)/%	中值粒径/ mm	体积质量/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	有机质质 量分数/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
砂土	神木市(38.80°N,110.36°E)	0.269	3.269	96.462	0.197	1.580	2.669
沙黄土	神木市(38.79°N,110.37°E)	2.689	24.615	72.696	0.072	1.297	2.317
黄绵土	安塞区(36.80°N,109.28°E)	2.829	53.105	44.066	0.045	1.212	2.597
黑垆土	永寿县(34.84°N,108.13°E)	6.080	59.549	34.371	0.031	1.151	7.472

## 1.2 试验装置

漏斗加沙法<sup>[5]</sup>已被证明是能够准确测定细沟输沙能力的方法之一。因此,采用漏斗加沙法,所用装置主要由细沟水槽和供沙漏斗组成(图 1)。细沟水槽模拟细沟输沙水流,由 PVC 材料制成,其长、宽、高依次为 3.0、0.1、0.05 m,坡度可自由调节。水槽底部用油漆黏附试验土壤,以模拟近地表的粗糙度。水槽顶端焊接有储水水箱,用于水槽供水。通过橡皮水管依次串联自来水、不锈钢水桶、水泵、流量计为水箱供水。根据流量计读数,可调节水泵旋钮,直至水槽出水流量达到试验设定值。在试验过程中,需确保不锈钢水桶始终保持溢流状态,以维持水桶内的水位基本不变,保证稳定供水。细沟水槽底端安置有长、宽、高分别为 0.1、0.1、0.05 m 的下凹土样室,用于放置相同规格的土样盒。土样盒中装填松散土壤,并于试验开始前 24 h 进行饱和吸水处理。待土壤盒置于土样室后,在其上表面覆盖塑料滑片,以备试验用。供沙漏斗置于距离水槽储水水箱前段 10 cm 处,其与水槽的垂直距离为 12 cm,用于为水槽持续供沙。供沙漏斗中内置电机,电机启动后转动,可将装填于漏斗内部的土壤连续输入水槽中。漏斗出口

的出沙速率可通过调节电机转速控制。

径流量范围,试验共设置 4 种土壤(砂土、沙黄土、黄绵土和黑垆土)5 个坡度(9°、12°、15°、18°和 21°)和 4 个流量(5、7、9、11 L/min)。坡度和流量完全组合,3 次重复试验,每次试验连续收集 3 个泥沙样,共计 240 场次试验,720 个泥沙样品。

在试验开始前,将水槽坡度和流量调节至设定值。待水流稳定后,将试验土壤加入漏斗中,启动电机开始向水流供沙。在此期间,使用金属棒在漏斗下方适度搅拌,以确保由漏斗输出的土壤与水流能够充分且均匀地混合。随后,逐渐提高电机转速,直至供给的土壤无法完全被水流挟带(即水槽床面上仍有少量土壤淤积),此刻即可假定细沟水流中的含沙量已接近其最大值,即大致达到输沙能力<sup>[21]</sup>。此时的水流含沙率仍略低于输沙能力,而水槽下方的土样盒便可继续为水流提供额外的沙源,保证其达到输沙能力<sup>[22]</sup>。待含沙水流稳定后,迅速移除土样盒上的塑料滑片,开始细沟输沙能力的测定。使用塑料桶在水槽出口处连续接取泥沙样,每个泥沙样接取时间控制在 10 s 左右,并使用秒表进行准确记录。若土样盒中出现严重的土样分离现象,表明含沙水流实际含沙率与输沙能力仍相差较大,则舍弃该场次试验。接取的泥沙样在静置 12 h 后,撇去上层清水,将剩余泥沙样置于烘箱烘干,称取干泥沙的质量。

## 1.4 数据分析

细沟输沙能力的计算公式为:

$$T_c = \frac{M}{WT} \quad (1)$$

式中: $T_c$ 为细沟输沙能力,kg/( $\text{m}\cdot\text{s}$ ); $M$ 为干泥沙的质量,kg; $W$ 为水槽宽度,m; $T$ 为接样时间,s。将每个坡度和流量组合下的 9 个细沟输沙能力(3 个重复 $\times$ 3 个泥沙样)的平均值作为该组合下的细沟输沙能力。

细沟输沙能力在相邻坡度或流量间的变化趋势,可通过计算其在相邻坡度(或流量)间的增长率来加以表征:

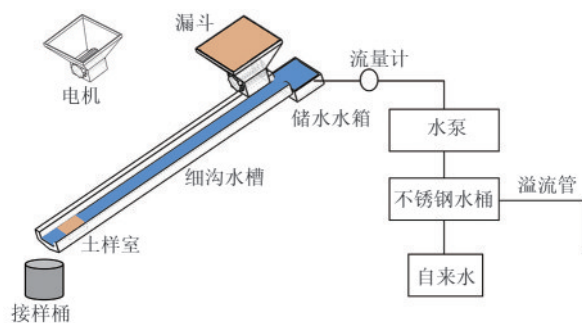


图 1 试验装置示意

Fig. 1 The diagram of test setup

## 1.3 试验步骤

试验于陕西师范大学地理试验场进行。根据黄土高原发生水蚀的典型坡度范围和降雨强度形成的

$$GR_s = \frac{T_{cs_2} - T_{cs_1}}{T_{cs_1}} \times 100\% \quad (2)$$

$$GR_Q = \frac{T_{c_{Q_2}} - T_{c_{Q_1}}}{T_{c_{Q_1}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $GR_s$  为细沟输沙能力在相邻设置坡度间的增长速率, %;  $T_{cs_2}$  和  $T_{cs_1}$  分别为流量在 S2 和 S1 水平的细沟输沙能力,  $kg/(m \cdot s)$ ,  $S2 > S1$ ;  $GR_Q$  为细沟输沙能力在相邻设置流量间的增长速率, %;  $T_{c_{Q_2}}$  和  $T_{c_{Q_1}}$  分别为流量在 Q2 和 Q1 水平下的细沟输沙能力,  $kg/(m \cdot s)$ ,  $Q2 > Q1$ 。

## 2 结果与分析

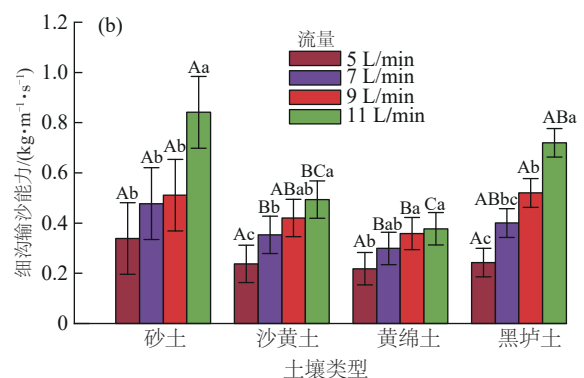
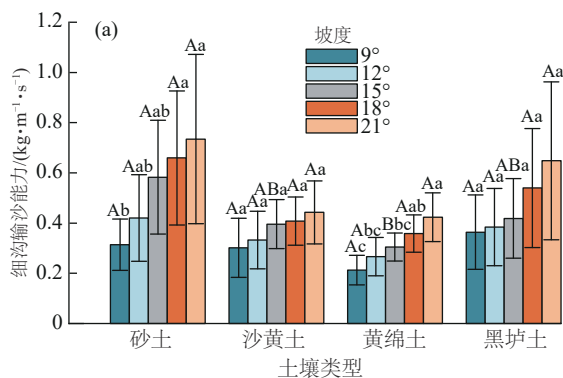
### 2.1 不同坡度和流量下细沟输沙能力的差异

4 种土壤的细沟输沙能力均随坡度或流量的增加而增加(图 2)。在同一坡度或流量条件下, 砂土的细沟输沙能力平均值依次高于黑垆土、沙黄土和黄绵土。在 18° 和 21°, 砂土的细沟输沙能力显著地高于其在 9°

细沟输沙能力( $p < 0.05$ )。对于黄绵土而言, 其在 21° 的细沟输沙能力显著高于在 9°、12° 和 15° 的细沟输沙能力( $p < 0.05$ )。相较之下, 黑垆土和沙黄土的细沟输沙能力随着坡度的递增变化并不显著, 在 5 个坡度下的细沟输沙能力无显著性差异(图 2a)。就流量而言, 砂土和黑垆土在 11 L/min 下的细沟输沙能力显著地高于 5、7、9 L/min 下的细沟输沙能力( $p < 0.05$ )。沙黄土和黄绵土在 9、11 L/min 下的细沟输沙能力也显著地高于 5 L/min 下的细沟输沙能力( $p < 0.05$ )(图 2b)。当坡度为 9°、12°、18° 和 21° 或流量为 5 L/min 时, 4 种土壤的细沟输沙能力间无显著性差异。

### 2.2 相邻坡度或流量间细沟输沙能力增长速率

由图 2 可知, 4 种土壤的细沟输沙能力均随着坡度(或流量)的增加呈非线性递增趋势, 因此, 将进一步探究细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)区间内的增长规律。



注: 不同小写字母表示同一土壤在不同坡度和流量下细沟输沙能力间存在显著差异( $p < 0.05$ ); 不同大写字母表示不同类型土壤在同一坡度或流量下细沟输沙能力存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图 2 不同坡度或流量条件下细沟输沙能力间差异

Fig. 2 Differences in the rill sediment transport capacity under varying slope gradients or flow rates

2.2.1 相邻坡度间细沟输沙能力增长速率 4 种土壤细沟输沙能力在相邻坡度间的增长速率不一致(图 3)。砂土细沟输沙能力在相邻坡度间的增长速率在 9、11 L/min 下呈递减趋势, 与在 5、7 L/min 下先增加后波动减小趋势形成鲜明对比(图 3a)。黑垆土细沟输沙能力在相邻坡度间的增长速率在 5、9 L/min 下呈持续缓慢增加趋势, 而在 7、11 L/min 下则呈先增加再减小趋势(图 3d)。在 5 L/min 下, 黄绵土和沙黄土的细沟输沙能力在相邻坡度间的增长速率呈先增加后减小趋势; 但在 7、9、11 L/min 下, 分别呈先减小后波动增加或持续增加趋势(图 3b、图 3c)。

2.2.2 相邻流量间的细沟输沙能力增长速率 相较于细沟输沙能力在相邻坡度间的增加速率, 其在相邻流量区间的增加速率表现出更为剧烈的变化特征(图 4)。在 9° 和 21°, 黄绵土和黑垆土的细沟输沙能力在相邻流量区间的增加速率均呈先增加

后减小趋势; 而在其余 4 个坡度下, 则呈持续降低或先减小后增加趋势(图 4c、图 4d)。对于砂土和沙黄土而言, 细沟输沙能力在相邻流量下的增长速率分别在 9° 和 12° 逐渐减小; 而在其余坡度呈先减小后增加变化趋势(图 4a、图 4b)。

### 2.3 细沟输沙能力预测模型

细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)间的增长速率并非恒定不变, 即细沟输沙能力与坡度和流量存在着复杂的非线性关系。除小坡度或小流量下, 4 种土壤细沟输沙能力在相邻坡度或流量间的增加速率呈变缓趋势(图 3、图 4), 即细沟输沙能力的递增幅度在达到某一特定坡度或流量后趋于稳定, 此变化趋势在函数表达形式上更符合幂函数的特征。因此, 尝试采用幂函数形式, 描述 4 种土壤细沟输沙能力对坡度(或流量)的响应关系(表 2)。拟合方程表明, 幂函数均能准确描述 4 种土壤细沟输沙能力与坡度(或

流量)的关系,拟合方程的决定系数( $R^2$ )为 0.713~1.000。坡度的幂指数( $b$ )随着流量的增加呈先减小后增加趋势,表明 4 种土壤的细沟输沙能力对坡度的敏感性均随着流量的增加呈先削弱后增强趋势。同理,随着坡度的增加,黑垆土、沙黄土和黄绵土的细沟输沙能力对流量的响应程度也呈先减小后增加趋势,而砂土的细沟输沙能力对流量的响应程度则呈波动增加趋势。综上所述,4 种土壤的细沟输沙能力对坡度或流量的响应强度均受到流量或坡度的间接影响。鉴于坡度和流量对细沟输沙能力存在复杂的

耦合效应,依次构建基于坡度和流量的 4 种土壤的细沟输沙能力二元指数模型(式 4~7),且预测效果均较高( $R^2$ 为 0.839~0.945)(图 5)。

$$T_{c \text{ 砂土}} = e^{0.019S + 0.042Q} - 1.346, R^2 = 0.839 \quad (4)$$

$$T_{c \text{ 沙黄土}} = e^{0.008S + 0.029Q} - 1.056, R^2 = 0.943 \quad (5)$$

$$T_{c \text{ 黑垆土}} = e^{0.014S + 0.044Q} - 1.306, R^2 = 0.919 \quad (6)$$

$$T_{c \text{ 黄绵土}} = e^{0.012S + 0.019Q} - 1.090, R^2 = 0.945 \quad (7)$$

式中: $T_{c \text{ 砂土}}$ 、 $T_{c \text{ 沙黄土}}$ 、 $T_{c \text{ 黑垆土}}$ 和 $T_{c \text{ 黄绵土}}$ 分别为砂土、沙黄土、黑垆土和黄绵土的细沟输沙能力,kg/(m·s); $S$ 为坡度,(°); $Q$ 为流量,L/min。

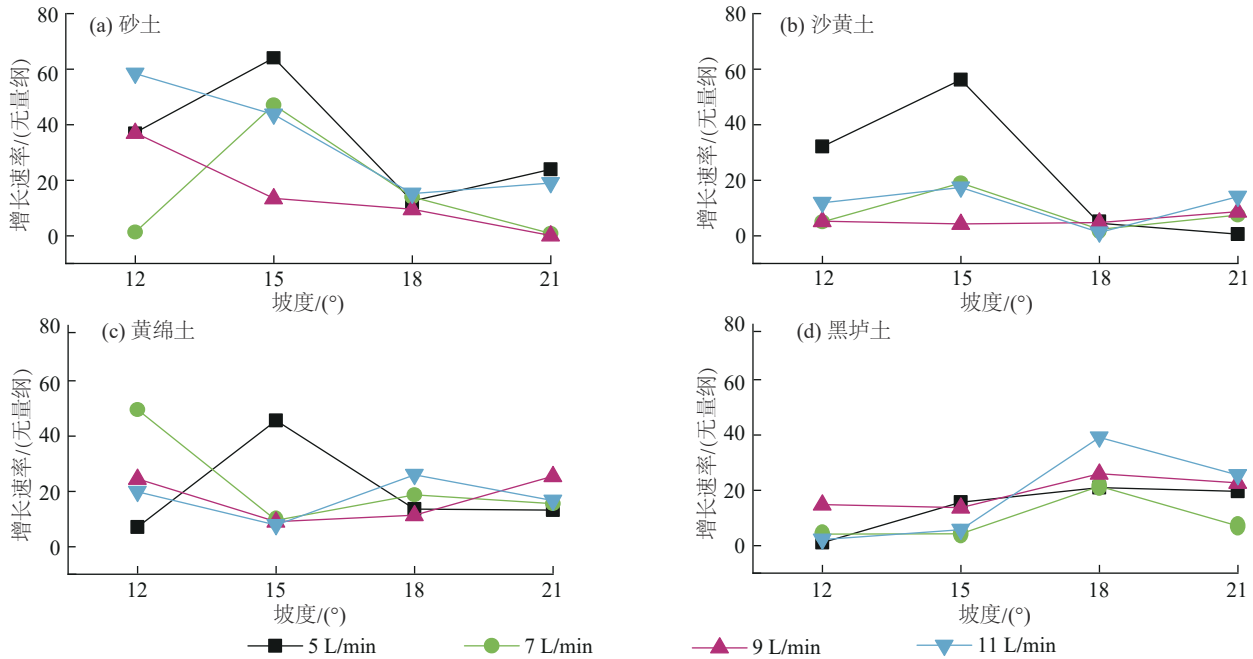


图 3 细沟输沙能力在相邻坡度间的增长速率

Fig. 3 The growth rate of rill sediment transport capacity between adjacent slope gradients

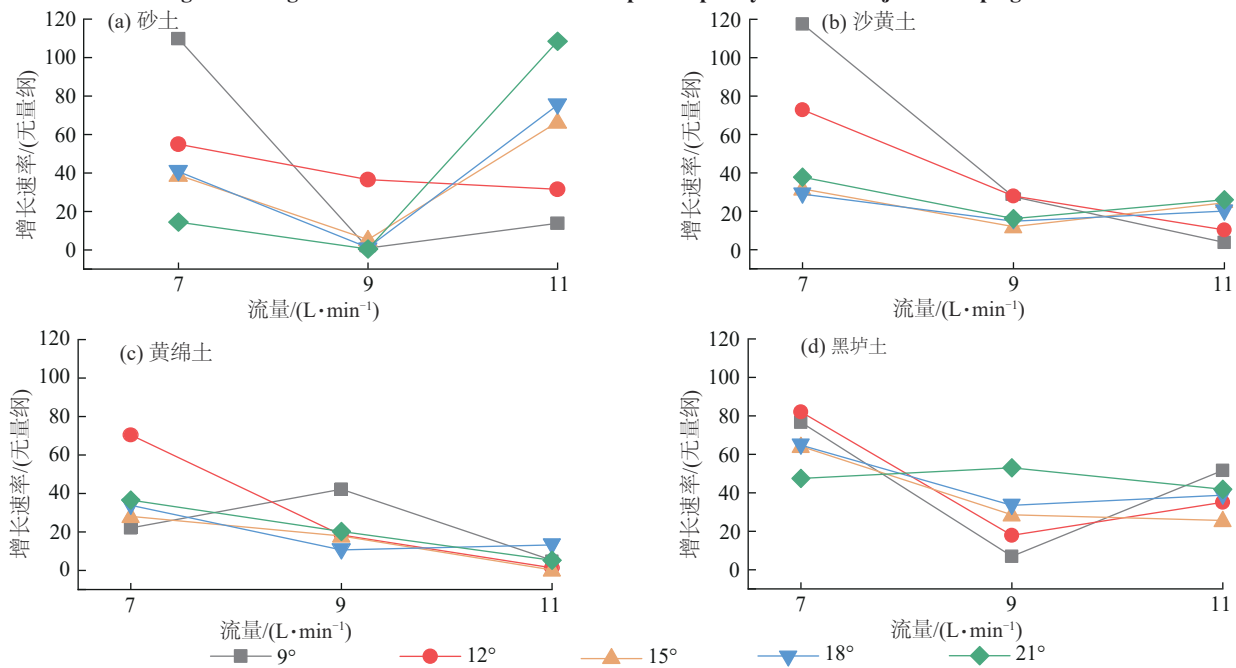


图 4 细沟输沙能力在相邻流量间的增长速率

Fig. 4 The growth rate of rill sediment transport capacity between adjacent flow rates

表 2 基于坡度或流量下的细沟输沙能力预测模型

Table 2 Prediction models for rill sediment transport capacity based on slope gradient or flow rate

类型	土壤类型	模型参数	基于坡度的预测模型 ( $T_c = aS^b$ )				基于流量的预测模型 ( $T_c = aQ^b$ )				
			5 L/min	7 L/min	9 L/min	11 L/min	9°	12°	15°	18°	21°
幂函数	砂土	a	0.005	0.046	0.086	0.018	2.699	11.030	11.471	14.234	22.207
		b	1.265	0.713	0.546	1.173	0.849	1.300	1.185	1.222	1.362
		$R^2$	0.974	0.886	0.898	0.980	0.791	1.000	0.867	0.836	0.713
	沙黄土	a	0.026	0.097	0.030	0.042	4.477	4.255	2.640	2.516	3.993
		b	0.681	0.435	0.866	0.867	1.068	1.009	0.748	0.717	0.869
		$R^2$	0.902	0.883	0.954	0.844	0.863	0.947	0.979	0.992	0.987
	黑垆土	a	0.012	0.020	0.036	0.031	8.398	8.487	8.015	18.251	34.354
		b	0.872	0.829	0.699	0.760	1.248	1.229	1.172	1.403	1.587
		$R^2$	0.960	0.976	0.949	0.963	0.933	0.974	0.994	0.996	0.994
黄绵土	a	0.016	0.103	0.190	0.110	1.678	1.920	1.139	1.722	2.306	
	b	0.828	0.377	0.243	0.459	0.815	0.778	0.518	0.617	0.667	
	$R^2$	0.849	0.947	0.942	0.962	0.940	0.853	0.913	0.978	0.955	
线性函数	砂土	a	-0.108	0.114	0.208	-0.206	0.034	-0.114	-0.068	-0.092	-0.132
		b	0.030	0.025	0.020	0.070	0.035	0.067	0.081	0.094	0.108
		$R^2$	0.979	0.885	0.872	0.989	0.781	0.998	0.858	0.825	0.688
	沙黄土	a	0.022	0.209	0.308	0.249	-0.039	-0.014	0.096	0.111	0.056
		b	0.014	0.010	0.007	0.016	0.043	0.043	0.037	0.037	0.048
		$R^2$	0.848	0.944	0.970	0.961	0.871	0.948	0.981	0.993	0.988
	黑垆土	a	0.071	0.213	0.058	0.095	-0.079	-0.086	-0.072	-0.193	-0.317
		b	0.012	0.012	0.031	0.042	0.055	0.059	0.061	0.092	0.121
		$R^2$	0.917	0.911	0.955	0.846	0.930	0.976	0.996	0.992	0.980
黄绵土	a	0.018	0.035	0.095	0.078	0.037	0.050	0.142	0.132	0.133	
	b	0.013	0.018	0.018	0.020	0.022	0.027	0.020	0.028	0.036	
	$R^2$	0.961	0.975	0.954	0.967	0.937	0.836	0.881	0.966	0.938	

注:  $T_c$  为细沟分离能力,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $S$  为坡度, ( $^\circ$ );  $Q$  为流量,  $\text{L}/\text{min}$ 。表中所有预测模型均在 0.01 显著性水平下具有统计学意义。

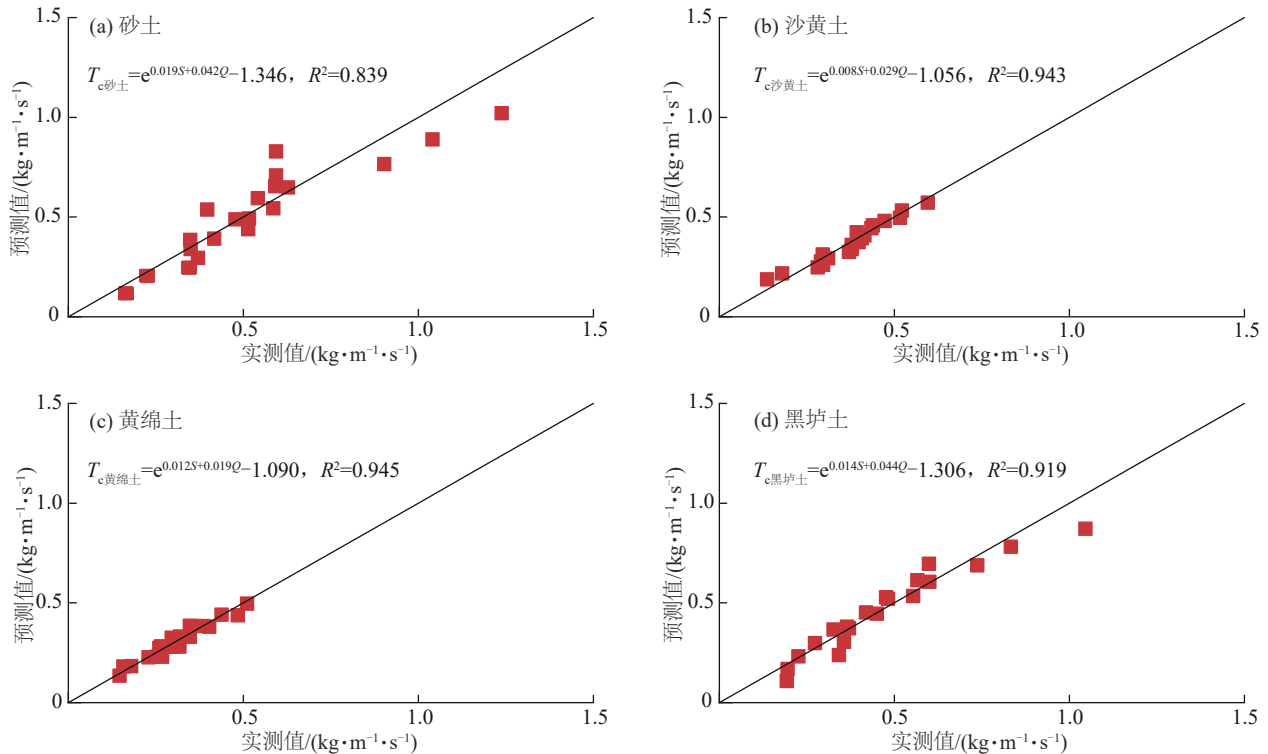


图 5 基于坡度和流量的细沟输沙能力二元指数模型的预测效果

Fig. 5 Predictive effectiveness of binary exponential models based on slope gradient and flow rate for estimating rill sediment transport capacity for four soils

### 3 讨论

#### 3.1 坡度和流量对细沟输沙能力的显著影响

坡度和流量是影响细沟输沙能力的关键因子。本研究中,4种土壤细沟输沙能力均随坡度或流量的递增呈递增趋势(图2),与XIAO等<sup>[16]</sup>研究结论一致。随着坡度和流量增加,水流重力沿坡面方向上切向分力逐渐增大,导致水流的流速和动能随之增加。在此情形下,水流获得更多用于输送泥沙的能量,提高其挟带泥沙颗粒的数量<sup>[11]</sup>。细沟输沙能力随坡度(或流量)的增加速率表现出高度非线性。可能与水流动能及土壤颗粒的可搬运性随坡度或流量的复杂动态变化有关。首先,水流重力势能沿着坡面的切向分量随坡度或流量的增加而呈先增后减变化趋势<sup>[23]</sup>。其次,当坡度超过某一特定阈值后,坡度对土壤颗粒稳定性的削弱作用和可搬运性的增强效果可能开始减弱<sup>[24]</sup>。由于机械组成和有机质质量分数的差异,不同土壤类型的细沟输沙能力随坡度或流量增加趋势存在差异。以坡度为例,随着坡度增加,砂土和沙黄土的细沟输沙能力的增长趋势逐渐变缓,而沙黄土和黄绵土细沟输沙能力的增长则呈逐渐加快趋势(图2)。相较于黑垆土和黄绵土,砂土和沙黄土的粒径更粗,质地更为松散。在大坡度条件下,水流在搬运较粗颗粒时需消耗更多的动能以克服土壤颗粒间和土壤颗粒与床面的碰撞和摩擦,进而削弱其搬运泥沙的数量及细沟输沙能力的增加趋势<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 细沟输沙能力在相邻坡度或流量间的变化趋势

4种土壤细沟输沙能力在相邻坡度或流量间增长速率的变化较为复杂混乱。泥沙输移过程是受多要素相互耦合影响的复杂物理过程,导致细沟输沙能力受土壤特性和水动力条件的综合影响<sup>[5]</sup>。本研究设计的坡度和流量相对有限,在一定程度上增加变化趋势的不确定性。值得注意的是,在本试验条件下,细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)间的递增速率并非保持恒定,即细沟输沙能力并非随着坡度(或流量)呈均匀增加趋势。同时,细沟输沙能力在相邻坡度间变化速率由快变慢的临界坡度是客观存在的(图3)。具体而言,当流量为5、7 L/min时,砂土细沟输沙能力在相邻坡度间增加速率的峰值出现在15°。类似地,在5 L/min下,沙黄土和黄绵土细沟输沙能力在相邻坡度间增加速率由快变缓的临界坡度也为15°。在大流量条件下,水流动能更大程度上取决于流量,而不受坡度的制约<sup>[25]</sup>。同时,坡度超过某一特定值后,随着坡度增加,土壤颗粒沿着坡面的重力分力的增加可能变得极为有限<sup>[26]</sup>。因此,在大流量下,影响细沟输沙能力在相邻坡度间增长速率的

临界坡度可能偏低。基于此假设,在9、11 L/min下,减缓砂土、沙黄土和黄绵土细沟输沙能力在相邻坡度间增长趋势的临界坡度被推断为 $<12^\circ$ 。对于黑垆土而言,在4个流量下,其细沟输沙能力在相邻坡度间增长速率的临界转折坡度可确定为 $18^\circ$ ,因为在该坡度下的细沟输沙能力增加速率均已达到峰值。与前人研究对比,LEI等<sup>[27]</sup>和WANG等<sup>[28]</sup>分别指出,当坡度达到 $20^\circ$ 和 $32.5\%$ ( $18.62^\circ$ )后,细沟输沙能力的增长显著减缓。临界坡度值均高于本研究成果( $<12^\circ$ 或 $15^\circ$ )。可能是本研究设置的流量(5~11 L/min)高于LEI等<sup>[27]</sup>(2~8 L/min)和WANG等<sup>[28]</sup>使用的流量(1.32~4.02 L/min),造成水流能量和土壤颗粒运移模式的转变在更小的坡度下即已发生。但由于每种土壤细沟输沙能力在相邻间流量的增长速率仅有3组,且其变化极为剧烈(图4),因此,无法准确推测得到影响细沟输沙能力变化趋势的临界流量。最后,不同类型土壤细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)间的增加速率,在数值和变化趋势上均展现出显著差异,可归因于不同类型土壤在颗粒粒径大小、形状、粗糙度、黏性等方面存在差异<sup>[29]</sup>。

#### 3.3 细沟输沙能力对坡度或流量的响应关系模型

为更准确揭示细沟输沙能力与坡度或流量间的最优函数形式,在不同坡度或流量下,比较线性模型与幂函数模型对细沟输沙能力的预测效果。由表2可知,预测不同坡度下的细沟输沙能力时,基于流量的幂函数模型预测精度( $R^2$ 为0.713~1.000)要略高于线性模型( $R^2$ 为0.688~0.998)。但在预测不同坡度下的细沟输沙能力时,基于坡度的线性模型( $R^2$ 为0.846~0.989)和幂函数模型( $R^2$ 为0.844~0.980)的预测效果则极为接近。尽管如此,相较于线性模型,幂函数形式的预测模型仍被认为更能准确刻画泥沙输移的物理过程。特别是在本试验条件下,细沟输沙能力在相邻坡度(或流量)区间内的增加速率均呈显著的非线性变化。因此,本研究推荐采用幂函数形式来预测不同坡度或流量下的细沟输沙能力。然而,值得注意的是,所构建模型中的幂指数均趋近于1(表2),在一定程度上也削弱线性模型和幂函数模型在细沟输沙能力预测效果上差异的显著性<sup>[21]</sup>。鉴于本研究中所使用的流量水平较低,细沟输沙能力的增加趋势相较于大流量下可能更为平缓,也进一步削弱线性模型和幂函数模型在细沟输沙能力预测上的精度差异。在基于坡度(或流量)的预测模型中,幂指数分别随着流量(或坡度)的变化而动态变化(表2),再次佐证细沟输沙能力可共同受到坡度和流量的交叉制约作用。

## 4 结论

1)4种土壤的细沟输沙能力均随坡度或流量的增加而增加。在同一坡度(或流量)下,砂土的细沟输沙能力平均值依次高于黑垆土、沙黄土和黄绵土。在坡度为 $15^\circ$ 及流量为7、9、11 L/min的条件下,砂土的细沟输沙能力显著高于黄绵土的细沟输沙能力( $p < 0.05$ )。在9、11 L/min下,黑垆土的细沟输沙能力也显著高于黄绵土的细沟输沙能力( $p < 0.05$ )。

2)随着坡度或流量的增加,4种土壤的细沟输沙能力在相邻坡度或流量间的增加速率呈非线性变化趋势。相较于4种土壤细沟输沙能力在相邻坡度间的增加速率,其在相邻流量间的增长速率则呈更为显著的波动性特征。

3)4种土壤的细沟输沙能力对坡度或流量的响应关系可用幂函数较好地描述( $R^2$ 为0.713~1.000)。细沟输沙能力对坡度的响应程度随着流量的增加呈先减小后增加趋势,而其对流量的敏感程度则随着坡度的增加呈先减小后增加或持续增加趋势。构建的基于坡度和流量的二元指数函数型预测模型可较准确地预测4种土壤的细沟输沙能力( $R^2$ 为0.839~0.945)。

本研究仅选取黄土高原4种土壤,且受限于数据量,仅对每种土壤分别建立模型。未来研究可考虑引入更多土壤类型,获取不同试验条件下的细沟输沙能力数据,开发普适性较高的细沟输沙能力预测模型。

### 参考文献:

- [1] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.  
LIU B Y, YANG Y, LU S J. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 9-16.
- [2] 刘见波,高光耀,傅伯杰.黄土区草地不同组分与土壤侵蚀关系及其对降雨情景的响应[J].生态学报,2023,43(4):1496-1505.  
LIU J B, GAO G Y, FU B J. Study on the relationship between grassland components and soil erosion and its responses to rainfall scenarios in the loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1496-1505.
- [3] 杨茹珍,张凤宝,杨明义,等.急陡黄土坡面细沟侵蚀的水动力学特性试验研究[J].水土保持学报,2020,34(4):31-36.  
YANG R Z, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Hydraulic characteristics of rill erosion on steep loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 31-36.
- [4] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.  
ZHENG F L, GAO X T. Research progresses in hill-slope soil erosion processes [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 230-235.
- [5] 张光辉.对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J].水科学进展,2018,29(2):151-158.  
ZHANG G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 151-158.
- [6] 高晨焱,张宽地,杨明义.基于无量纲水流强度指标的坡面流输沙能力计算方法[J].农业工程学报,2018,34(17):134-142.  
GAO C Y, ZHANG K D, YANG M Y. Overland flow sediment transport capacity calculation method based on non-dimensional flow intensity index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 134-142.
- [7] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.  
HAN Z, CHEN X Y, LI Y H, et al. Comparison of sediment transport capacity along rills of partially saturated and non-saturated soils [J]. Mountain Research, 2020, 38(6): 841-850.
- [8] 谭贞学,王占礼,刘俊娥,等.黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J].中国水土保持科学,2011,9(5):1-6.  
TAN Z X, WANG Z L, LIU J E, et al. Response of runoff-induced sediment discharge to hydrodynamic parameters of rill on loess hillslope [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 1-6.
- [9] YAO C, ZHANG Q W, WANG C F, et al. Response of sediment transport capacity to soil properties and hydraulic parameters in the typical agricultural regions of the Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2023, 879: e163090.
- [10] LIU C G, LI Z B, FU S H, et al. Influence of soil aggregate characteristics on the sediment transport capacity of overland flow [J]. Geoderma, 2020, 369: e114338.
- [11] 孟书翰,厉晓峰,杨佳慧,等.黄绵土细沟水流输沙能力对地表冲刷流量的响应[J].水土保持学报,2022,36(6):63-69.  
MENG S H, LI X F, YANG J H, et al. Response of sediment transport capacity of rill flow to surface scouring discharge in loess soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 63-69.
- [12] ZHAO L Y, ZHANG K D, WU S F, et al. Comparative study on different sediment transport capacity based on dimensionless flow intensity index [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2289-2305.
- [13] 师宏强,刘刚,谷举,等.不同坡度坡面径流输沙能力对集中流流量变化的响应[J].水土保持学报,2018,32

- (1):25-31.
- SHI H Q, LIU G, GU J, et al. Response of sediment transport capacity under different slope to the change of concentrate flow rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):25-31.
- [14] 刘晨光, 李占斌, 符素华, 等. 我国主要水蚀区缓坡坡面水流挟沙力差异研究[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(3):9-14.
- LIU C G, LI Z B, FU S H, et al. Study on the difference of sediment transport capacity of flow on gentle slope in major water erosion regions of China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(3):9-14.
- [15] FENG R, CHEN J C, XIE Z Y, et al. Experimental determination of sediment transport capacity of rill flow over sandified loess slope[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(2):301-310.
- [16] XIAO H, LIU G, LIU P L, et al. Sediment transport capacity of concentrated flows on steep loessial slope with erodible beds[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):e2350.
- [17] 王莎, 王占礼, 袁殷, 等. 黄土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4):104-107.
- WANG S, WANG Z L, YUAN Y, et al. Sediment transport capacity of rill flow on loess hill slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):104-107.
- [18] 赵海滨, 闫国新, 姚文艺, 等. 黄土坡面径流输沙能力试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6):41-44.
- ZHAO H B, YAN G X, YAO W Y, et al. Experimental study on sediment transport capacity of sheet flow over loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6):41-44.
- [19] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1):11-19.
- LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1):11-19.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:20-34.
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:20-34.
- [21] 申楠. 黄土地区细沟水流分离输沙过程研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- SHEN N. Study of the processes of soil detachment and sediment transport by rill flow on the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [22] ZHANG G H, LIU Y M, HAN Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1298-1304.
- [23] 李彦海, 陈晓燕, 韩珍, 等. 紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3):657-664.
- LI Y H, CHEN X Y, HAN Z, et al. Response of flow in rills to subsurface water flow in sediment transport capacity on purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3):657-664.
- [24] 高鹏宇, 詹振芝, 蒋芳市, 等. 坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):68-73.
- GAO P Y, ZHAN Z Z, JIANG F S, et al. Effects of slope and flow on sediment transport capacity of the colluvial deposit for rill flow in Benggang [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):68-73.
- [25] 杨大明, 高佩玲, 张晴雯, 等. 黄土坡面细沟水动力学特性试验研究[J]. *泥沙研究*, 2018, 43(4):49-56.
- YANG D M, GAO P L, ZHANG Q W, et al. Hydraulic characteristics of rill erosion on loess slope [J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(4):49-56.
- [26] ZHAN Z Z, JIANG F S, CHEN P S, et al. Effect of gravel content on the sediment transport capacity of overland flow[J]. *Catena*, 2020, 188:e104447.
- [27] LEI T W, ZHANG Q, ZHAO J, et al. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(6):1537-1542.
- [28] WANG Z, YANG X, LIU J, et al. Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 70(1):36-44.
- [29] 于现举, 刘晨光, 符素华, 等. 有黏性和无黏性沙坡面流的挟沙力比较[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(6):9-14.
- YU X J, LIU C G, FU S H, et al. Comparison on flow transport capacity of overland flow between cohesive and non-cohesive sand [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(6):9-14.