

黄土高原水蚀风蚀交错区风沙土细沟分离能力探究

朱启明,程西科,刘俊娥,齐小倩,杨莉婷,崔钦凯,周正朝

(陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119)

摘要: 细沟侵蚀产沙是黄土高原水蚀风蚀交错区坡面侵蚀产沙的主要来源,明确该区细沟侵蚀过程特征及其影响因素,对有效防控入黄泥沙和维护流域安全具有重要的科学意义和实践价值。选取水蚀风蚀交错区下垫面典型风沙土为研究对象,通过不同流量(3,5,7,9,11 L/min)、不同坡度(9°,12°,15°,18°,21°)组合下的室内水槽冲刷试验定量揭示风沙土细沟分离过程对坡度、流量以及流速的响应关系,并建立分离能力方程。结果表明:(1)分离能力对坡度和流量的响应均呈线性正相关关系,且相关性极显著。流量对风沙土分离能力的影响大于坡度。除了受到坡度、流量的影响,分离能力还受到坡度和流量叠合作用影响,这 3 种因子对分离能力影响由强到弱依次为流量、坡度和流量的叠合作用、坡度,且分离能力与这 3 种因子的关系可用线性正相关关系表示。(2)流速可作为反映坡度和流量之间叠合作用的关键因子。细沟分离能力对流速的响应呈显著线性正相关关系,试验条件下,临界流速为 0.607 m/s。(3)坡度与流量组合下,坡度、流量与坡度和流量叠合作用组合下,单个流速因子下以及坡度、流量与流速因子组合下的 4 个分离能力方程均能较好地预测和模拟风沙土的分离能力,其中考虑坡度、流量以及坡度和流量叠合作用的方程拟合效果最佳。该研究结果可为完善水蚀风蚀交错区细沟水蚀过程模型提供一定的理论基础。

关键词: 分离能力; 细沟侵蚀; 水蚀风蚀交错区; 黄土高原; 流速

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0189-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.024

Research on the Rill Detachment Capacity of Aeolian Sandy Soil in the Water-wind Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau

ZHU Qiming, CHENG Xike, LIU June, QI Xiaoqian, YANG Liting, CUI Qinkai, ZHOU Zhengchao

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract: The sediment yield caused by rill erosion is the main source of sediment yield in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau. It is of great scientific significance and practical value to make clear the characteristics of rill erosion process and its influencing factors in this region, so as to effectively prevent and control sediment entering the Yellow River and effectively maintain the safety of the watershed. In this study, the typical aeolian sandy soil on the underlying surface in the water-wind erosion crisscross region was selected as test soil, and the indoor flume scouring experiments with different flow discharges (3, 5, 7, 9, 11 L/min) and different slope gradients (9°, 12°, 15°, 18°, 21°) were carried out, so as to establish equations, which could quantitatively reveal the response of rill detachment capacity to slope gradient, flow discharge and flow velocity. The results showed that: (1) The responses of detachment capacity to slope gradient and to flow discharge were both linearly and positively correlated, and the correlation were significant. The influence of flow discharge on detachment capacity was greater than that of slope gradient. In addition, detachment capacity was also affected by the superposition effect of slope gradient and flow discharge. The order of the influences on detachment capacity were: flow discharge, superposition effect of slope gradient and flow discharge, slope gradient. The relationships between detachment capacity and above three factors could also be well expressed by linearly positive correlations. (2) Flow velocity could be used as a key factor to reflect the superposition effect between slope gradient and flow discharge. There was a significant positively

linear correlation between rill detachment capacity and flow velocity. Under the experimental conditions, the critical velocity was 0.607 m/s. (3) The four detachment capacity equations under the combination of slope gradient and flow discharge, under the combination of slope gradient, flow discharge and the superimposed effect of slope gradient and flow discharge, under the single flow velocity factor, and under the combination of slope gradient, flow discharge and flow velocity factor could predict and simulate the detachment capacity of aeolian sandy soil well, among which the equation considering the combination of slope gradient, flow discharge and the superimposed effect of slope gradient and flow discharge was the best. The results provide a theoretical basis for perfecting the rill erosion process model in water-wind erosion crisscross area.

Keywords: detachment capacity; rill erosion; water-wind erosion crisscross region; Loess Plateau; flow velocity

土壤侵蚀是指水和风等外营力对土壤的消损过程^[1]。土壤侵蚀造成耕地面积减少,土地肥力下降,加快生态退化,并诱发自然灾害,严重阻碍经济与社会和谐发展,已成为亟待解决的世界性生态难题之一。黄土高原地区由于其特殊的地理位置及频繁的人为破坏,已经成为我国乃至世界上水土流失以及土壤侵蚀最为严重的地区之一。而黄土高原北部水蚀风蚀交错区是黄土高原强烈的侵蚀中心,同时也是黄河下游河床粗泥沙颗粒的主要来源区。该区地表破碎程度高,沟道密度大,生态环境极其脆弱,加之水系密集,水蚀、风蚀交替发生,土壤侵蚀尤为剧烈。强烈侵蚀致使该区出现黄河流域最高含沙量和最大输沙模数,直接影响黄河健康运行及黄河下游的生态安全^[2-4]。位于水蚀风蚀交错区的神木市,由于风力活动带来的沙层改变了该流域的地表物质组成,形成风积沙和风成黄土^[5]。地表物质质地粗,结构松散,抗蚀性弱,加之这里处于黄土高原暴雨中心区,暴雨及特大暴雨频发,具备细沟侵蚀发生发展的有利条件。因此,细沟侵蚀产沙成为黄土高原水蚀风蚀交错区坡面侵蚀产沙的主要来源,开展水蚀风蚀交错区细沟侵蚀研究具有重要的科学意义和实践价值。

土壤分离过程是细沟侵蚀发生的初始阶段,为输沙和泥沙沉积提供物质基础。分离能力是研究土壤分离过程的重要参数和指标,土壤分离能力是含沙量为零时坡面径流分离土壤的最大值,是确定细沟可蚀性和土壤临界剪切力的基础。对细沟水流分离能力的研究主要集中在影响分离过程的两大因素方面^[6],即水流水动力学特性和土壤性质。细沟水流的水动力学特性包括坡度与流量等水力条件因子。坡度与流量组合的变化是土壤获得不同侵蚀动力的基础,并直接影响土壤的分离过程,学者们以此进行了大量研究。Zhang 等^[7]研究粉质壤土的分离过程后发现,粉质壤土的分离能力与流量呈现较好的线性函数关系;王秋霞等^[8]试验研究发现,西南红壤的分离速率与坡度呈现显著的线性关系;Xiao 等^[9]研究认为,土壤分

离能力随流速和坡度分别呈线性和指数增加;申楠等^[10]进行了黄绵土的水槽冲刷试验,建立了流量和坡度的二元幂函数细沟水流分离能力模型;Cao 等^[11]试验发现,随着坡度以及流量的增加,土壤的分离能力与坡度和流量的关系从线性函数变为幂函数。坡度以及流量作为基本的试验条件设定,可组合产生流速和水深等变化,而流速也是坡面上一个十分重要的水动力学参数,直接关系到坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程^[12]。张光辉等^[13]使用平均流速精准地预测了黄绵土的分离能力;郝好鑫等^[14]通过比较红壤分离能力与水动力学参数的相关性得出,在 8 种水动力学参数中,平均流速与土壤侵蚀率的相关性仅次于单宽流量以及坡度;Wang 等^[15]的研究说明使用流速因子模拟分离能力的效果优于单位水流功率;Li 等^[16]通过比较得出,流速对于分离能力的拟合效果略低于剪切力以及水流功率;Zhu 等^[17]则研究认为,流速对于中国西南山区紫色土分离能力的拟合效果较差。

综上,目前已有大量研究聚焦于大流量之下土壤分离能力与坡度、流量、流速之间的关系,并建立了相关关系模型。但对于不同质地的土壤,其分离能力与坡度、流量之间的关系函数都不尽相同。针对黄土高原地区研究选取的试验土壤大多为黄绵土,而对于水蚀风蚀交错区的典型风沙土的研究有待加强;同时,针对径流形成初期小流量控制下的侵蚀过程中的土壤分离过程也还较少。因此,开展小流量条件下风沙土细沟分离能力的研究对于分析分离能力与水动力之间的相互关系、检验现有的土壤侵蚀物理模型以及治理黄土高原北部的水土流失,具有重要的理论意义。本文通过水槽试验方法,研究不同坡度和小流量组合下,黄土高原水蚀风蚀交错区典型风沙土的细沟分离能力与坡度、流量以及流速之间的关系,建立小流量条件下基于坡度、流量以及流速的土壤分离能力方程。

1 材料与方法

1.1 试验装置与试验土壤

室内水槽冲刷试验于陕西师范大学地理实验室

进行。试验装置主要分为 3 个部分:供水装置、水槽和土样室(图 1)。供水装置主要由水泵、水箱、溢流管以及流量计组成。用橡皮水管依次连接自来水龙头、水泵、水箱、流量计、水槽贮水箱,在水箱上部导出溢流管。水箱与贮水水箱之间的水管之间装有控制流量的流量计。试验水槽是 PVC 材质,规格为 $3\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.05\text{ m}$,主要由贮水水箱、水槽构成。水槽坡度可以自由调节。土样室规格为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$,用以试验时放置土样盒。

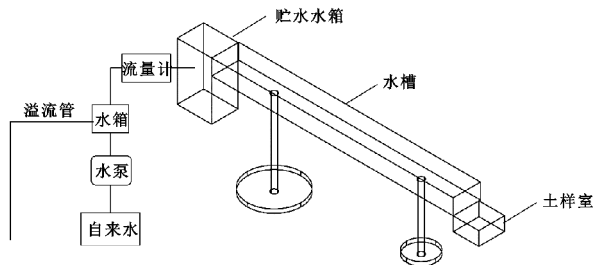


图 1 试验装置示意

试验土壤类型为风沙土,取自位于黄土高原北部的陕西省神木县西部,该地属于典型的黄土高原水蚀风蚀交错地带。按国际制进行分类,土壤中黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.002\sim0.02\text{ mm}$)、砂粒($0.02\sim2\text{ mm}$)含量分别为 0.55% 、 1.89% 、 97.56% ,土壤类型为砂土及壤质砂土。土壤容重为 1.57 g/cm^3 ,有机质含量为 5.14 g/kg 。试验前先将土壤置于通风状态下风干,再将风干后的土壤过 5 cm 的筛网,筛除杂质。筛过的风干土壤按照设计土壤干容重(1.57 g/cm^3)分层均匀装入土样盒($10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$)之中。将土样盒底部放于水中 12 h 使其达到饱和状态,再静置 6 h ,滤去土样内多余重力水。将静置过后的土样盒放于土样室之内,盖上塑料滑片以备试验用。

1.2 流速测量

为减少水流流量的不稳定性,试验过程中始终保持水箱的溢流管流出水,即保证水箱处于溢流状态。通过控制水泵的阀门来控制流量,根据流量计读数调节水泵出水量,使其达到试验设计流量,再用量筒在水槽底部测量实际流量,进行流量核验并微调,使实际流量与设计流量误差在 5% 以内。

流速测量使用高锰酸钾染色法,在距离水槽底部土样室 2 m 的地方滴加高锰酸钾溶液,测量染色水体到达位于水槽下部土样室的时间。不同的坡度、流量组合下,分别在水槽的左、中、右部分各测量 3 次,根据 9 次的平均时间推算出平均流速。染色法测得的是水流的表层流速,需要进行校正。根据雷诺数判断水流流态,分别乘以对应系数(层流, 0.6 ; 过渡流, 0.7 ; 紊流, 0.8)得到修正后的水流流速^[18-19]。

1.3 土壤分离能力测定

土壤分离能力是指在清水条件下细沟水流所能

分离土壤的最大值。在将土样盒放入水槽下部的放样室内并盖上塑料滑片之后,开始放水并调整流量,在水流达到稳定状态之后,迅速拿开滑片。为了减少冲刷深度对于径流的影响,设计冲刷深度为 1.5 cm ^[20]。当水流对土壤的冲刷深度达到 1.5 cm 时,迅速盖上滑片并关水,纪录冲刷时间,取出土样盒中的剩余土样,放入烘箱完全烘干后进行称重。土壤分离能力计算公式为:

$$D_c = \frac{W}{T \times A} \quad (1)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; W 为试验前后土样盒中的土样质量差 (kg); T 为冲刷时间 (s); A 为土样盒的投影面积 (m^2)。

试验设计坡度分别为 $9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 21^\circ$ 共 5 个坡度,流量为 $3, 5, 7, 9, 11\text{ L/min}$ 共 5 个流量。坡度和流量完全组合 25 场试验,每场试验均重复 3 次,合计 75 场次。

2 结果与分析

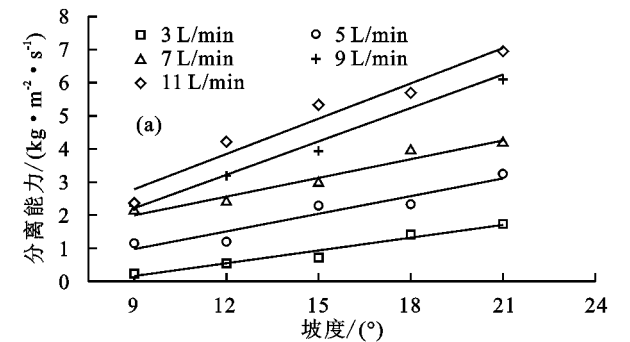
2.1 坡度、流量对分离能力的影响

坡度和流量是影响分离能力的基本因子,两者对土壤分离过程都起着至关重要的作用。土壤分离能力与坡度、流量的关系见图 2。由图 2a 可知,在同一流量条件下,分离能力随着坡度的增大而增大。分离能力的大小取决于水流的动能大小。在相同流量条件下,随着坡度的不断增加,水流的重力势能逐渐增加,导致水流动能增加。同时,水流沿着坡面方向的重力分力也会增加,使得水流流速受重力分力增加的影响而加快增加,进而增加水流的动能。因此,分离能力随坡度的增大而增加。3 个较小流量下 ($3, 5, 7\text{ L/min}$),分离能力总体上随坡度的增幅较缓,而 2 个较大流量下 ($9, 11\text{ L/min}$),分离能力的增幅明显较快。分离能力与坡度之间的关系可以用线性函数很好地表示(表 1),模型决定系数(R^2)均大于 0.9 , F 统计值均表明在 0.01 水平上显著。

由图 2b 可知,同一坡度下,分离能力随流量的增加而增加。随着流量的不断增加,单位时间内过水断面通过的水量增多,水流的重力势能增大,使水流沿坡面运动时流速逐渐增加,进而导致水流动能的增加,使得水流用于分离土壤的能量越多。因此,分离能力随着流量的增加而增加。相对而言,随着流量的增加,4 个较大坡度下 ($12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 21^\circ$) 分离能力增长趋势较为一致,均显著大于小坡度 (9°) 的增长趋势。分离能力与坡度的关系可以用线性函数表示(表 2),模型决定系数(R^2)均大于 0.86 , F 统计值均表明在 0.01 水平上显著。

双因素方差分析结果表明,坡度的 F 检验值为 13.224 ,流量的 F 检验值为 31.776 ,结果在 0.01 水平

都表现出较高的显著性,说明在本试验中,流量和坡度因子对分离能力的影响均达到显著水平,且流量对



分离能力的影响大于坡度对分离能力的影响。综合考虑流量、坡度对分离能力的影响,建立分离模型为:

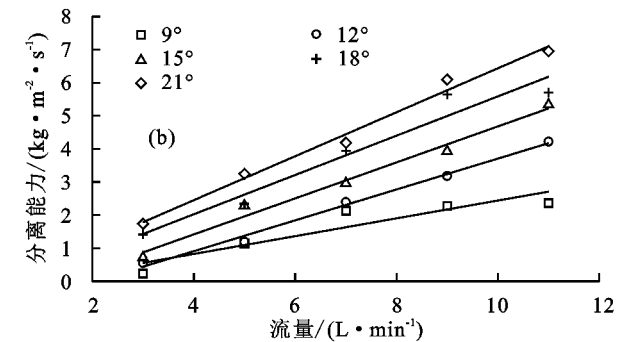


图 2 分离能力与坡度、流量的关系

$$D_c=0.508Q+0.237S-4.065,R^2=0.928,$$
$$F=156.536>F(2,22)=6.81 \quad (2)$$

式中: Q 为流量(L/min); S 为坡度(°)。

在模型(2)中,流量因子的系数(0.508)明显大于坡度的系数(0.237),这也佐证双因素方差分析得到流量对于分离能力的影响大于坡度的影响这一结果。

综合表 1 和表 2 可知,线性函数的系数均随着流量(或坡度)的增加而增加,系数表示分离能力在特定条件下增长的趋势,这表明坡度与流量之间有一种相互叠合的作用在影响着土壤分离过程^[21]。为了更好地定量比较坡度、流量以及二者的叠合作用对于土壤分离能力的影响,建立了分析方程为:

$$D_c=0.049Q+0.023S+0.031Q \cdot S-0.853,$$
$$R^2=0.972,F=276.179>F(2,22)=6.81 \quad (3)$$

在方程(3)中,采用 $Q \cdot S$ 表示坡度与流量之间的叠合作用。比较各系数可知,流量的系数最大,坡度和流量叠合作用的系数次之,坡度的系数最小,这表明影响分离能力的程度由强到弱依次为流量>坡度和流量的叠合作用>坡度,这也再次验证上述双因子方差分析的正确性。从拟合效果分析,相较于仅考虑坡度和流量因子建立的分离模型,考虑坡度和流量之间的叠合作用可以提高拟合效果。因此,无论是基于考虑叠合作用在分离过程中的作用,还是为了提高拟合模型的精度,在研究分离过程中的坡度和流量因子时,关注二者叠合作用是很有必要的。

表 1 不同流量下细沟水流分离能力随坡度变化的经验方程

流量/ (L·min ⁻¹)	拟合方程	R^2	F	p
3	$D_c=0.129S-0.999$	0.960	72.08	0.01
5	$D_c=0.178S-0.625$	0.914	31.70	0.01
7	$D_c=0.188S-0.298$	0.957	67.30	0.01
9	$D_c=0.336S-0.818$	0.973	109.02	0.01
11	$D_c=0.355S-0.415$	0.951	58.70	0.01

注: D_c 为土壤分离速率[kg/(m²·s)]; S 为坡度(°)。

表 2 不同坡度下细沟水流分离能力随流量变化的经验方程

坡度/(°)	拟合方程	R^2	F	p
9	$D_c=0.269Q-0.251$	0.857	17.96	0.01
12	$D_c=0.466Q-0.958$	0.993	457.67	0.01
15	$D_c=0.544Q+0.759$	0.984	185.47	0.01
18	$D_c=0.594Q-0.351$	0.949	55.73	0.01
21	$D_c=0.664Q-0.207$	0.988	244.66	0.01

注: D_c 为土壤分离速率[kg/(m²·s)]; Q 为流量(L/min)。

2.2 分离能力对流速的响应

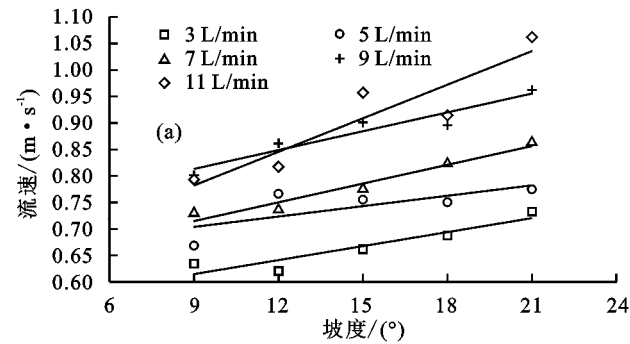
流速是描述坡面水流水动力大小的一个重要参数。坡度与流量的叠合作用对分离能力具有显著影响,而坡度和流量的不同组合可产生不同的水流流速。从图 3 可以看出,在相同流量下,流速随着坡度的增加而增加;在相同坡度下,流速随着流量的增加而增加,说明流速受坡度和流量叠合作用的影响。为了进一步研究流速与上述叠合作用的相互关系,对流速与叠合作用($Q \cdot S$)进行相关性分析发现,流速与叠合作用之间的皮尔逊相关系数高达 0.957,且在 0.01 水平显著。因此,流速可作为反映坡度和流量叠合作用的关键因子,是直接反映坡度和流量叠合作用对分离能力影响的重要参数。

从图 4 可以看出,分离能力随着流速的增加呈线性增长趋势,其关系式为:

$$D_c=16V-9.719,R^2=0.897,$$
$$F=210.588>F(1,23)=9.63 \quad (4)$$

公式(4)中 F 统计量结果表现为显著,拟合效果极显著。随着流速的增加,水流动能也增加,进而水流会携带更多能量用于分离土壤。因此,土壤分离能力出现随着流速的增加而递增的趋势。分析得到的线性关系式与前人研究所得出的两者呈现幂函数的关系不同,可能是因为试验设计差异以及土壤类型不同造成的。柳玉梅等^[22]的试验中,所用的壤土按照设计含水率(18%)装填。含水率的差异可能导致土

壤颗粒之间黏结力的变化^[23],进而导致土壤对于侵蚀能量响应模式的不同。此外,相比于本试验使用的风沙土,柳玉梅等^[22]和 Sirjani 等^[23]使用的壤土以及壤质黏土,其黏粒以及粉粒含量更高,而砂粒含量则少得多,从而导致土壤分离能力的差异。同时,试验流量的变化范围也对分离能力产生影响,本试验采用



的流量(3,5,7,9,11 L/min)显著小于柳玉梅等^[22]采用的流量(30,60,90,120 L/min),也小于 Sirjani 等^[23]的试验流量(4.5,6,7.5,9,10.5,12 L/min)。小流量条件下,随着流速的增加,分离能力增加趋势相对平缓。综上,本研究得到的线性关系体现了风沙土分离过程在小流量下的特殊性。

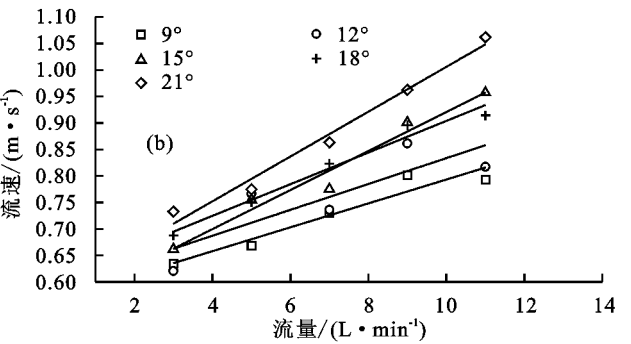


图 3 流速与坡度、流量的关系

同时,为了更好地研究单个流速因子在分离过程中的作用,将分离能力分别与坡度、流量、流速进行相关性分析表明,相关性由高到低依次为流速、流量和坡度,皮尔逊系数依次为 0.949,0.791,0.555。流速的相关性高于单一的坡度或流量,佐证了张光辉等^[24]认为的控制土壤分离速率的水动力参数为能量而不是力这一观点。因此在缺乏坡度和流量的相关资料时,可以先行测量流速以初步估算土壤侵蚀量。根据拟合曲线的截距得出,本文土壤分离的临界流速为 0.607 m/s。在本试验条件下,当水流流速 <0.607 m/s 时,水流所携带的动能很难分离土壤颗粒;而当流速 >0.607 m/s 时,分离过程显著发生,土壤分离量开始显著增加。

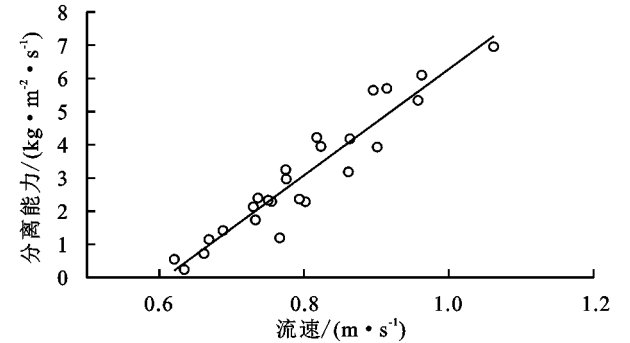


图 4 分离能力与流速的关系

2.3 分离能力方程构建与分析

流量对于分离能力的影响程度依次大于坡度与

流速的叠合作用和坡度,而作为表征坡度和流量叠合作用的因子,流速也是模拟分离能力的合适参数。综合考虑坡度、流量和流速的影响,建立基于不同因子的分离能力方程(表 3),结果表明,基于坡度、流量以及坡度与流量叠合作用建立的模型拟合效果最佳($R^2=0.972$),依次优于基于坡度、流量、流速($R^2=0.940$)和坡度、流量($R^2=0.928$)以及流速($R^2=0.897$)建立的模型。模型的决定系数(R^2)均高于 0.89, F 统计量在 0.01 水平显著,模型的拟合效果较好。同时,为了进一步比较拟合效果,按照表 3 中的顺序依次计算各模型的土壤分离能力预测值,所得的土壤分离能力平均值分别是实测平均值的 1.00,1.01,1.00,0.99 倍。将实测的分离能力与各方程计算所得的预测值进行比较(图 5)可知,使用表 3 中的方程得到的预测值与实测值的比值接近 1:1,线性斜率依次为 0.935,0.987,0.902,0.948。以上结果也佐证了文中建立的分离模型拟合效果较好。

综上,本文基于不同因子建立的 4 组分离能力方程拟合效果均较好,拟合方程得到的预测值与实测值接近。在进行风沙土分离能力预测时,考虑叠合作用的基于坡度和流量因子模型更为合适;但相较于流速,坡度和流量因子的实际测量和获取可能更为困难,因此在获取实际坡度和流量数值困难情况下也可使用流速因子来预测分离能力。

表 3 基于不同因子建立的分离能力方程

序号	因子	拟合关系式	R^2	F
1	坡度、流量(不含叠合作用)	$D_c=0.237S+0.508Q-4.065$	0.928	156.54
2	坡度、流量(含叠合作用)	$D_c=0.023S+0.049Q+0.031Q \cdot S-0.853$	0.972	276.18
3	流速	$D_c=16V-9.719$	0.897	210.59
4	坡度、流量、流速	$D_c=0.164S+0.316Q+6.130V-6.511$	0.940	127.45

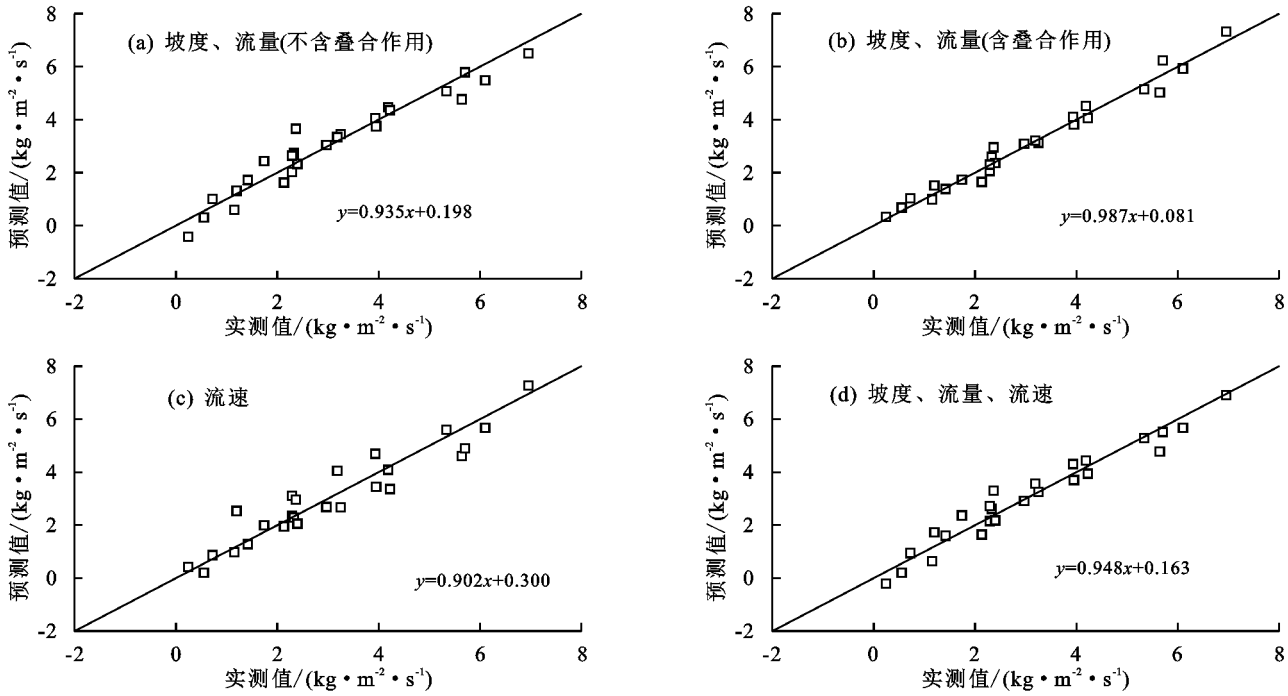


图 5 基于预测值和实测值比较的分离能力方程验证

3 结论

(1)分离能力对坡度和流量的响应均呈线性正相关关系,且相关性极显著。流量对风沙土分离能力的影响大于坡度。除受到坡度、流量的影响,分离能力还受到坡度和流量叠合作用的影响。这 3 种因子对分离能力的影响由强到弱依次为流量、坡度和流量的叠合作用及坡度,且分离能力与这 3 种因子的关系可用线性正相关关系很好地表示。

(2)流速可作为反映坡度和流量叠合作用的关键因子。细沟分离能力对流速的响应呈显著线性正相关关系,试验条件下,临界流速为 0.607 m/s。流速与分离能力的相关性高于坡度、流量与分离能力的相关性。

(3)综合考虑坡度、流量以及流速对分离能力的影响,依次建立了基于坡度与流量组合下,坡度、流量与坡度和流量叠合作用组合下,单个流速因子,以及坡度、流量和流速因子组合下的风沙土分离能力方程,4 个方程均能较好地预测和模拟风沙土的分离能力,其中考虑坡度、流量以及坡度和流量叠合作用的方程拟合效果最佳。

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.
[2] 张辉,李鹏,汤珊珊,等.多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J].泥沙研究,2016(6):59-65.
[3] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology,2017,553:447-456.

[4] Zhang Q Y, Fan J, Zhang X P. Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills[J].Journal of Soils and Sediments,2016,16(9):2306-2315.
[5] 曹晓娟,谢林好,张风宝,等.沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化贡献的定量分析[J].地理学报,2019,74(5):962-974.
[6] 张光辉.土壤分离能力测定的不确定性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):1-6.
[7] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J].Soil Science Society of America Journal,2003,67(3):713-719.
[8] 王秋霞,丁树文,夏栋,等.花岗岩崩岗区不同层次土壤分离速率定量研究[J].水土保持学报,2016,30(3):65-70.
[9] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China[J].Hydrological Processes,2017,31(14):2613-2621.
[10] 申楠,王占礼,陈浩.黄土坡面细沟水流分离能力[J].山地学报,2015,33(2):191-198.
[11] Cao L X, Zhang K L, Zhang W. Detachment of road surface soil by flowing water[J].Catena,2009,76(2):155-162.
[12] 郑良勇,李占斌,李鹏.黄土区陡坡侵蚀过程试验研究[J].土壤与环境,2002,11(4):356-359.
[13] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.
[14] 郝好鑫,杜一凡,曹丹妮,等.红壤缓坡水流动力学特性及其对侵蚀影响的试验研究[J].中国水土保持科学,2018,16(2):1-8.

34(1):202-209.

[16] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Responses of plant water use to a severe summer drought for two subtropical tree species in the central southern China [J].Journal of Hydrology,2016,8:1-9.

[17] 夏银华,章新平,戴军杰,等.亚热带季风区樟树树干液流对降水的响应[J].水土保持研究,2021,28(6):144-152,161.

[18] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.

[19] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology,1987,3(4):309-320.

[20] 刘文茹,彭新华,沈业杰,等.激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正[J].生态学杂志,2013,32(5):1181-1186.

[21] 王锐,章新平,戴军杰,等.亚热带针阔混交林土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 中水稳定同位素特征[J].生态环境学报,2021,30(6):1148-1157.

[22] Bögelein R, Thomas F M, Kajmen A, et al. Leaf water ¹⁸O and ²H enrichment along vertical canopy profiles in a broadleaved and a conifer forest tree [J]. Plant, Cell and Environment,2017,40:1086-1103.

[23] 罗紫东.洞庭湖流域部分常见树种的光合作用和水分利用研究[D].长沙:湖南师范大学,2016.

[24] 吴丽杰, Arisa K, 付培立, 等.热带季节性湿润林苦楝 (*Melia azedarach*) 径向生长季节动态及其对环境因子的响应[J].生态学报,2020,40(19):6831-6840.

[25] 金鹰,王传宽,周正虎.木本植物木质部栓塞修复机制:研究进展与问题[J].植物生态学报,2016,40(8):834-846.

[26] Munoz-Villers L E, Holwerda F, Alvarado-Barrientos M S, et al. Reduced dry season transpiration is coupled with shallow soil water use in tropical montane forest trees[J].Oecologia,2018,188(1):303-317.

[27] Amin A, Zuecco G, Geris J, et al. Depth distribution of soil water sourced by plants at the global scale: A new direct inference approach[J].Ecohydrology,2020,13:e2177.

[28] Goldsmith G R, Muñoz-Villers L E, Holwerda F, et al. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest[J].Ecohydrology,2012,5:779-790.

[29] 赵西宁,李楠,高晓东,等.基于¹⁸O示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析[J].农业工程学报,2018,34(3):135-142.

(上接第 194 页)

[15] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2018,266:68-75.

[16] Li T Y, Li S Y, Liang C, et al. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation[J].Cate-na,2019,178:90-99.

[17] Zhu X L, Fu S H, Wu Q Y, et al. Soil detachment capacity of shallow overland flow in Earth-Rocky Mountain Area of Southwest China[J].Geoderma,2020,361:e114021.

[18] Horton R E, Leach H R, Vliet R V. Laminar sheet-flow [J]. Transactions American Geophysical Union, 1934,15(2):393-404.

[19] 曹颖,张光辉,唐科明,等.地表覆盖对坡面流流速影响的模拟试验[J].山地学报,2011,29(6):654-659.

[20] 张光辉.冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J].水土保持学报,2002,16(2):1-4.

[21] 郭继成,张科利,董建志,等.西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J].土壤学报,2013,50(6):1102-1108.

[22] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等.坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J].农业工程学报,2009,25(6):96-99.

[23] Sirjani E, Mahmoodabadi M. Study on flow erosivity indicators for predicting soil detachment rate at low slopes[J].International Journal of Agricultural Science Research and Technology,2012,2(2):55-60.

[24] 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(4):882-886.