

DOI: 10.11766/trxb201910090461

李彦海, 陈晓燕, 韩珍, 顾小杰, 陈仕奇. 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 Yanhai, CHEN Xiaoyan, HAN Zhen, GU Xiaojie, CHEN Shiqi. 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.

紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应*

李彦海, 陈晓燕, 韩珍, 顾小杰, 陈仕奇

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 地表径流与近地表水流耦合作用会引发强烈的土壤侵蚀。输沙能力作为土壤侵蚀的关键参数之一, 对完善近地表水流作用下的土壤侵蚀过程具有重要的理论意义。通过限定性细沟模拟试验, 采用从底部供水的方式构建近地表水流, 在此基础上测定了距弱透水层不同饱和深度(5、10、15 cm)与水力条件(3个流量 2、4、8 L·min⁻¹, 3个坡度 5°、10°、15°)下细沟水流的输沙能力, 进一步采用多变量非线性方程分析流量、坡度、近地表水流饱和深度及其交互作用对细沟水流输沙能力的影响。结果表明, 输沙能力随近地表水流饱和深度的增加而增大且增大的速率逐渐减小, 最终输沙能力趋于稳定。细沟水流输沙能力与流量、坡度及近地表水流饱和深度呈正相关关系, 与坡度相比流量对输沙能力的影响作用更大。试验结果为明确地表径流与近地表水流耦合作用的土壤侵蚀机制提供了一定的理论基础与科学依据。

关键词: 输沙能力; 近地表水流; 流量; 细沟侵蚀; 水槽试验; 紫色土

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Response of Flow in Rills to Subsurface Water Flow in Sediment Transport Capacity on Purple Soil

LI Yanhai, CHEN Xiaoyan, HAN Zhen, GU Xiaojie, CHEN Shiqi

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: 【Objective】 Once surface runoff gets coupled with subsurface water flow, severe soil erosion would be triggered off. As one of the key parameters of soil erosion, sediment transport capacity is of important theoretical significance to perfecting the knowledge about soil erosion process as affected by subsurface water flow. 【Method】 With the aid of certain experimental methods and devices, an experiment was designed and carried out with nozzles laid out at different locations under an artificial slope of purple soil to supply water from the bottom, so as to simulate subsurface water flow. Through a series of tests, sediment transport capacity of rill flow was determined as affected by water saturation depth (5, 10 and 15 cm) in the subsurface, flow rate (2, 4 and 8 L·min⁻¹) and slope gradient (5°, 10° and 15°). A multivariate nonlinear equation was used to analyze effects of flow discharge, slope gradient, subsurface water saturation depth and their interaction on sediment transport capacity. 【Result】 Experimental results show that the maximum volume of sediment increased with increasing subsurface water saturation depth, but

* 国家自然科学基金项目(41571265)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41571265)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: c400716@126.com

作者简介: 李彦海(1996—), 男, 甘肃甘南人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: liyanhai552415236@163.com

收稿日期: 2019–10–09; 收到修改稿日期: 2020–03–07; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020–03–26

it increased more when the saturation depth reached 5-10 cm than when it did 10-15 cm. When the subsurface water saturation depth increased from 5 to 15 cm, the increment rate of rill sediment transport capacity varied from -6.67% to 43.24% on the slope of 5°, from 2.22% to 15.37% on the slope of 10°, and from 0.99% to 11.54% on the slope of 15°, which indicate that rill sediment transport capacity increased as subsurface saturation depth increased, but with the increment rate declining and gradually leveling off in the end. And the determination coefficient of the equation fitting sediment transport capacity with subsurface water saturation depth was 0.87-0.99, but when the flow discharge was 2 L·min⁻¹ on the slope of 5°, the determination coefficient was only 0.35, because there was no interaction between subsurface water flow and surface runoff. Moreover, a nonlinear correlation equation was established for fitting relationships between slope gradient, flow discharge, subsurface water saturation depth and sediment transport capacity with a determination coefficient of 0.98. Compared with the slope gradient, the flow discharge was a more important factor affecting sediment transport capacity. 【Conclusion】 Sediment transport capacity is positively related to slope gradient, flow discharge and subsurface water saturation depth, but as it is rising on, it is losing its momentum gradually. Subsurface water saturation depth is an important factor affecting sediment transport capacity, exhibiting an exponential relationship. With the presence of subsurface water flow, flow discharge and slope gradient interacts significantly with each other, and subsurface water saturation depth and flow discharge does too. All the findings in this experiment may provide a certain theoretical and scientific basis for elucidating the mechanism of the coupling of surface runoff and subsurface water flow affecting soil erosion. Therefore, in the study on erosion control on slope farmlands of purple soil and related soil erosion prediction models, it is essential to recognize the importance of subsurface water flow in the effort to improve rationality of the prevention and control measures and accuracy of the prediction models.

Key words: Sediment transport capacity; Subsurface water flow; Flow discharge; Rill erosion; Flume experiments ; Purple soil

在砂页岩上形成的幼年紫色土, 具有较高的入渗性能, 特别是紫色土坡耕地中的根孔、虫孔或秸秆腐烂形成的大孔隙, 会成为雨水进入土壤的优先通道。当雨水渗至耕层与土壤下伏母质层交界面弱透水层时, 下渗受阻, 易形成近地表水流^[1-3]。近地表水流会显著改变土壤的孔隙水压力、降低土壤的临界抗剪切应力, 从而增加土壤的可蚀性^[4-6]。地表径流与近地表水流耦合作用的侵蚀机理是目前土壤侵蚀领域研究的难点与热点。

近年来, 研究者们已经开始关注近地表水流与坡面土壤侵蚀的关系。Nouwakpo 等^[4]发现在近地表水流的作用下, 土壤的可蚀性增加 5.64 倍, 临界剪切力降低 0.2~1.0 Pa。Huang 和 Laften^[5]的研究表明当坡度为 10°时, 入渗的水流使地表径流的含沙量提高 81%。Rockwell^[7]认为近地表水流深度的变化显著影响其对地表土壤侵蚀过程的作用(特别是非饱和土)。输沙能力作为判断泥沙沉积或剥蚀的重要依据^[8], 是众多土壤侵蚀过程模型的核心参数^[9-11]。因此, 量化近地表水流对输沙能力的影响是了解近地表水流荷载下紫色土坡面细沟侵蚀机理、建立相关耦合侵蚀模型的关键。研究者们通过大量野外与室内试验对地表径流输沙能力进行测算^[12-15]。张晴雯等^[16]通过

试验得到的细沟剥蚀率与含沙量的关系, 推导出输沙能力的解析式。Zhang 等^[17]分析了流量、坡度及径流流速等因子与输沙能力的关系, 并认为水流功率是陡坡输沙能力的首选预测因子。Nouwakpo 和 Huang^[18]采用室内供沙土槽试验研究了地下水文条件变化对输沙能力的影响, 结果表明从自由排水到饱和, 再到低渗、高渗, 输沙能力逐渐增加。

虽然近地表水流在土壤侵蚀过程中的影响已经得到重视, 但由于近地表水流存在于土壤当中难以观测, 且近地表耦合侵蚀过程极其复杂, 目前有关近地表水流作用下细沟水流输沙能力的测定试验与数据依旧相当缺乏。因此本文通过测定不同近地表水流饱和深度、流量、坡度条件下紫色土细沟水流的输沙能力, 并建立输沙能力的定量化模型, 以期明确地表径流与近地表水流耦合侵蚀机制提供一定的理论基础与科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究供试土壤采于重庆市紫色土坡耕地 (29°48'39" N, 106°25'27" E), 试验所用紫色土属沙

溪庙组灰棕紫泥。该地区属亚热带湿润气候，年平均气温 18.2 °C，年平均降水量 1 105 mm，分布不均匀，大部分降水集中在夏季，占年降水量的 70%。试验前筛除土壤中石块、草根，并进行破碎处理，风干后过 10 mm 筛。供试土壤容重为 1.28 g·cm⁻³，初始土壤含水率为 3%，土壤机械组成采用激光粒度仪测定，黏粒 (<0.002 mm) 含量 13.00%，粉粒 (0.05~0.002 mm) 含量 33.91%，砂砾 (> 0.05 mm) 含量 53.09%，属于砂壤土。

1.2 试验装置

本试验所用土槽长 6 m，宽 1 m，每隔 10 cm 隔一钢板。因钢板存在一定的厚度，为保证 9 个土槽的宽度为 10 cm，最后一个土槽未能达到试验要求，弃之不用。故最后用于试验的土槽共 9 条，将每条土槽看作一条限定性细沟，规格为 6 × 0.1 × 0.35 m。试验前在上坡接入长为 2 m 的供沙土槽，将供沙土

槽抬高 10°，这样在相同的土槽长度下可产生更多的泥沙，帮助径流达到输沙能力^[19]。取其中的一个土槽为例画装置示意图，如图 1 所示。在 6 m 长的水平段布设近地表水流供水装置，近地表水流供水装置及原理与 Huang 等^[20]的一致。本研究在其基础上通过变换水头差（改变供水管高度）的方式调节近地表水流饱和深度（如图 2），采用极小的供水流量将水流供入土槽底部沙层，使距弱透水层不同深度（5 cm，10 cm，15 cm）的土壤达到饱和。假设土壤水的速度接近于土壤饱和导水率。用环刀法^[21]测得供试土样的饱和导水率为 16.61 × 10⁻³ cm·min⁻¹，则近地表水流达到设计饱和深度（5 cm、10 cm、15 cm）所需的时间分别约为 3.92 h、7.83 h 以及 11.75 h。为保证每次试验除设计变量以外条件的一致性，本试验每次底部供水时统一用相同的供水流量从土槽底部向土壤内部供水。

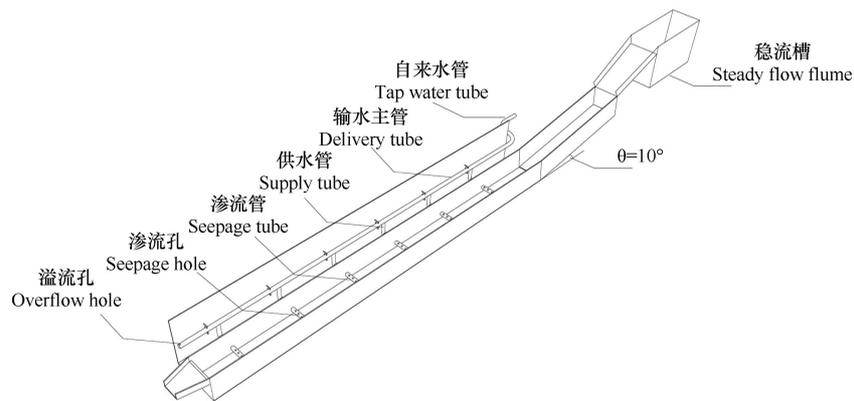


图 1 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus

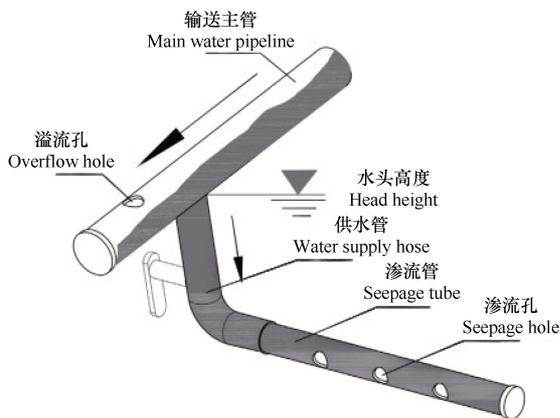


图 2 水头控制装置

Fig. 2 Water head controlling device

1.3 试验步骤

试验前，在土槽两旁涂抹凡士林并粘上供试土壤，减少边界效应。将土均匀填入土槽内，厚度约为 20 cm，用以模拟耕作层^[22-23]。用防水记号笔在挡板上标记好填土的位置，以保证重复试验填土的一致性。在供沙土槽内填入粒径 < 4 mm 的土壤至离土槽边缘 5 cm 处，不考虑容重。填土完毕后将外部的供水管调到试验设计的近地表水流饱和深度开始供水。当近地表流达到预期饱和深度后将土槽调至设计的坡度。用蠕动泵与稳流槽向上坡供沙土槽内供水，约 3~5 min 后径流含沙量在水平段趋于稳定，使用 5 个 300 cm³ 的不锈钢杯连续收集土槽出口处

的径流样 5 份。用烘干法测定径流含沙量(式(1)),采用式(2)计算输沙能力。在数据处理过程中去除 5 份样品中径流含沙量的最大值与最小值,取剩余 3 份样品的平均值作为一次重复的结果。将 3 次重复的计算结果取平均值作为径流含沙量和输沙能力。本试验共设计 3 个流量(2、4、8 L·min⁻¹); 3 个坡度(5°、10°、15°); 3 种近地表水流饱和深度(5、10、15 cm), 每组试验重复三次, 共进行了 81 场试验。

1.4 数据处理

径流含沙量采用式(1)进行计算

$$C = \frac{m_1}{m_1/\rho + m_2/\rho_0} \times 1000 \quad (1)$$

式中, m_1 为烘干后土壤颗粒的质量, g; m_2 为水的质量, g; ρ_0 为水的密度, g·cm⁻³; ρ 为土壤颗粒密度, 取 2.65 g·cm⁻³。

径流输沙能力采用式(2)进行计算

$$T_c = C_{\max} q \quad (2)$$

式中, T_c 为输沙能力, kg·m⁻¹·s⁻¹; C_{\max} 为由式(1)计算得到的最大含沙量, kg·m⁻³; q 为单宽流量, m²·s⁻¹。

文中散点拟合图采用 Origin 9 软件完成, 装置示意图由 CAD 2010 软件完成, 数据分析采用 SPSS 20.0 软件完成。

2 结果

2.1 最大含沙量与输沙能力

最大含沙量与流量、坡度以及近地表水流饱和深度的关系见图 3。由图 3 可知, 最大含沙量随着

流量的增加而逐渐增大。相较于其他坡度, 在坡度为 5°时, 流量对最大含沙量的影响更明显。最大含沙量随着坡度的增加而逐渐增大。对于其他坡度间的增长幅度, 坡度由 5°变为 10°后, 最大含沙量的增幅最大。最大含沙量随着近地表水流饱和深度的升高而逐渐增大。在近地表水流饱和深度由 5 cm 升至 10 cm 时, 最大含沙量的增长速率较 10 升至 15 cm 时大。在 5°, 2 L·min⁻¹ 条件下, 细沟径流的最大含沙量并未随近地表水流饱和深度的变化发生明显的变化, 这可能是因为在该条件下细沟水流具有的能量较低, 地表径流冲刷形成的细沟深度较浅, 未能接触到近地表水流, 地表径流与近地表水流未发生交互作用(表 1)。这也进一步说明了地表径流与近地表水流的交互作用会影响细沟径流的最大含沙量。利用式(2)计算不同流量、坡度以及近地表水流饱和深度下输沙能力的变化, 如图 4 所示。与最大含沙量的变化相似, 输沙能力随着流量、坡度以及近地表水流饱和深度的增加而逐渐增大, 且输沙能力的增长速率会随着这些变量的增加而逐渐变缓(表 1)。

2.2 输沙能力与近地表水流间的关系

为量化近地表水流对细沟水流输沙能力的影响, 利用不同近地表水流饱和深度下测得的输沙能力构建近地表水流饱和深度与输沙能力的非线性回归模型, 如式(3)所示。

$$T_{CS} = a(1 - e^{-bh}) \quad (3)$$

式中, T_{CS} 为细沟水流输沙能力, kg·m⁻¹·s⁻¹; h 为近地表水流饱和深度, cm; a 与 b 为回归系数。上式所表达的物理意义与试验结果相符, 输沙能力随着近地表水流饱和深度的增高而逐渐增加, 但增加的速率越来越小, 最终输沙能力逐渐趋近于 a 值。 a 值代表了土壤饱和时细沟径流的输沙能力。 b 为随

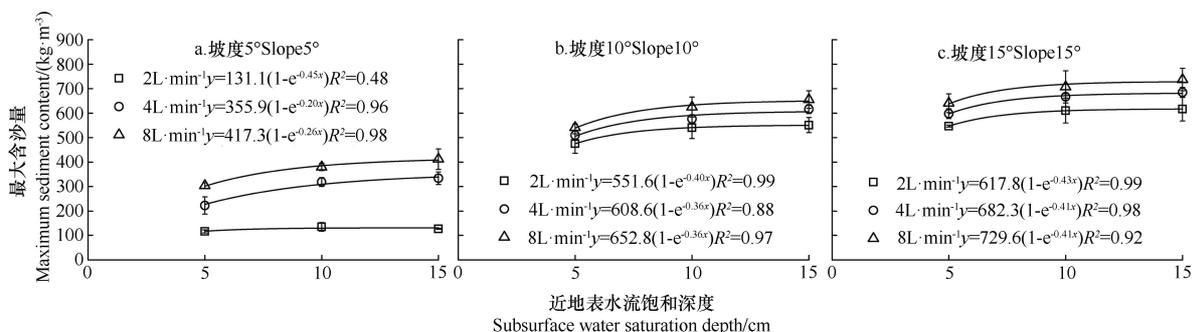


图 3 最大含沙量与近地表水流饱和深度的关系

Fig. 3 Relationship between maximum sediment content in runoff and subsurface water saturation depth

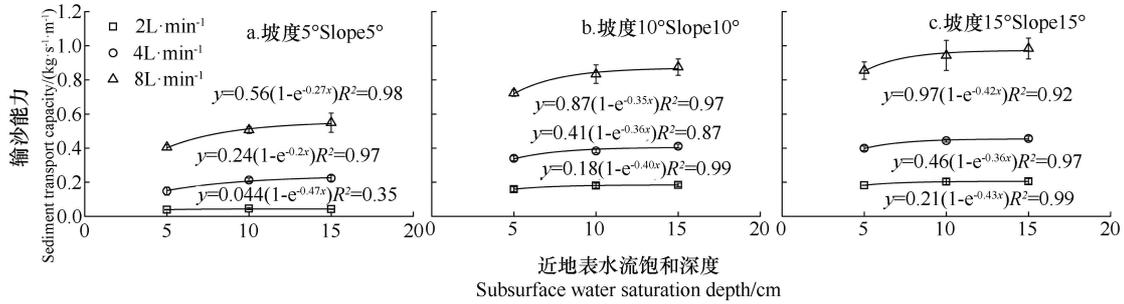


图 4 输沙能力与近地表水流饱和和深度的关系

Fig. 4 Relationship between sediment transport capacity and subsurface water saturation depth

表 1 不同近地表水流饱和和深度下的输沙能力增长率

Table 1 Sediment transport capacity increment rate relative to subsurface water saturation depth

近地表水流饱和和深度变化 Variation of subsurface water saturation depth/cm	坡度 Slope/°	流量 Flow discharge/ (L·min ⁻¹)		
		2	4	8
5~10	5	15.38	43.24	24.94
10~15	5	-6.67	5.19	8.5
5~10	10	13.21	12.94	15.37
10~15	10	2.22	7.03	4.92
5~10	15	11.54	11.28	10.42
10~15	15	0.99	2.93	4.24

近地表水流饱和和深度增加输沙能力增长幅度的衰减系数，其值的大小与流量和坡度有关。

用式 (3) 对不同坡度、不同流量下输沙能力随近地表水流饱和和深度变化的试验数据进行拟合，拟合结果见图 4。拟合方程的决定系数 R^2 均很高，最低为 0.87，最高达到了 0.99。但 5° 、 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下，拟合方程的 R^2 为 0.35，这是因为在 5° 、 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时近地表水流未与地表径流发生交互作用，近地表水流并未参与此种情况下地表径流的输沙过程。根据输沙能力与近地表水流饱和和深度的拟合结果，可以发现两者间符合指数函数关系，近地表水流饱和和深度的变化显著影响细沟水流输沙能力。

2.3 流量、坡度及近地表水流饱和和深度与输沙能力的关系

为确定流量、坡度与近地表水流饱和和深度耦合作用对输沙能力的影响，引入多变量非线性方程来分析各个变量及其交互作用对输沙能力的影响，如式 (4) 所示。

$$T_{CS} = a_0 + a_1S + a_2q + a_3h + a_4Sq + a_5Sh + a_6qh + a_7S^2 + a_8q^2 + a_9h^2 \quad (4)$$

式中， S 为坡度的正弦值，无量纲； q 为单宽流量， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ； h 为近地表水流饱和和深度， m ； $a_0, a_1, a_2, \dots, a_9$ 为回归系数。由于坡度与单宽流量的量级差别太大，因此在计算回归系数时将单宽流量的单位由 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 换算为 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

将不同流量、坡度及近地表水流饱和和深度下输沙能力的试验值代入式 (4) 进行逐步回归，得到式 (5)：

$$T_{CS} = -0.065 + 0.156q + 1.991Sq + 1.028qh \quad (5)$$

式 (5) 的决定系数 R^2 为 0.98。说明式 (5) 可以很好地表示坡度、单宽流量以及近地表水流饱和和深度对输沙能力的影响。为了进一步分析流量、坡度以及近地表水流饱和和深度三个变量对输沙能力的影响，用三个变量分别对式 (5) 求偏导，得到各自的偏微分方程，如式 (6)~式 (8) 所示。

$$\frac{\partial T_{CS}}{\partial S} = 1.991q \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_{CS}}{\partial q} = 0.156 + 1.991S \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_{CS}}{\partial h} = 1.028q \quad (8)$$

由式 (5) 与 (6) 可知，输沙能力与坡度呈正相关关系。式 (5) 与图 4 表明，坡度对输沙能力的作用受到流量的影响，且在小流量下输沙能力随坡度增加幅度大于其在大流量下随坡度的增加幅度。例如，在 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 10 cm 下，坡度由 5° 升高至 15°

后输沙能力增加了 3.51 倍；而流量为 $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，相应的输沙能力仅增加了 0.86 倍。式 (7) 表示了流量与输沙能力的关系，因为坡度 S 的正弦值在 $0\sim 90^\circ$ 内恒大于零，所以式 (7) 恒大于零，这说明输沙能力随着流量的增大而持续增大。与坡度类似，流量对输沙能力的作用也受坡度的影响。在缓坡条件下输沙能力随流量的增加幅度大于其在陡坡条件下的增长幅度。例如，在 5° 、 10 cm 下，流量由 $2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加至 $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 后，输沙能力增加了 10.24 倍；而在 15° 、 10 cm 下，输沙能力增加了 3.65 倍。式 (8) 表示了近地表水流饱和深度对输沙能力的影响，该式表明输沙能力随着近地表水流饱和深度的升高而增大，近地表水流饱和深度与流量间存在交互作用。

3 讨论

由结果分析可知，地表径流与近地表水流的相互作用会使细沟水流的输沙能力增大。输沙能力的变化主要受流量、坡度以及近地表水流饱和深度的控制，其主要原因是坡度、流量及近地表水流饱和深度对土壤侵蚀动能与土壤性质的影响。

3.1 近地表水流存在时流量与坡度对输沙能力的影响

丁琳桥等^[24]测量了不同水力条件下紫色土的输沙能力，在坡度与流量相同的条件下其所测的输沙能力与本试验在近地表水流饱和深度为 5 cm 测得的输沙能力相近。这说明近地表水流存在时坡度及流量与输沙能力为正相关关系，三者的相互作用会

使输沙能力显著增加 (图 4)。一方面，流量越大，径流所拥有的能量越大，径流有更多的能量搬运泥沙，径流输沙能力增加。当坡面上形成细沟时，径流的能量更集中，流速增大，细沟中水流的剪切力增大，导致更大的径流输移能力^[25]。另一方面，坡度升高，重力沿坡面方向上的切向量随之增大，坡面径流的势能增大，径流的冲刷力增大，径流输沙能力增加^[15]。且坡度不仅会影响坡面径流的运动状态，也会影响坡面沉积物的稳定性。坡度越陡，坡面沉积物的稳定性越差，越容易被搬运运输^[26]。因此，输沙能力随着坡度的增加而增加，这与雷廷武^[1]、Ali 等^[27]的研究结果类似。但随着坡度的增加，输沙能力的增长幅度逐渐减小，这是因为 (1) 沿坡面方向上的重力势能不是随着坡度增加而线性增大，而是先增大后逐渐平缓^[15]；(2) 总重力势能在增加，但重力势能占总重力势能的比重逐渐减小^[19]。

虽然坡度和流量与输沙能力均呈正相关关系，但两个变量对输沙能力的贡献度有所不同。采用 Govers^[28]提出的输沙能力与坡度及流量间的关系模型 ($T_c = kq^\beta S^\gamma$)，对不同水流饱和深度条件下的输沙能力进行回归拟合，结果见表 2。流量系数 β 在 $1.14\sim 1.16$ 之间，坡度系数 γ 在 $0.54\sim 0.68$ 之间，在三种近地表水流饱和深度条件下， β 均要大于 γ 。这说明流量对输沙能力的贡献度大于坡度。Prosser 和 Rustomji^[29]认为 $1.0\leq\beta\leq 1.8$ ， $0.9\leq\gamma\leq 1.8$ ，而本研究中坡度系数 γ 未在本研究设计的坡度在 $5^\circ\sim 15^\circ$ 之间，坡度较小，而当坡度较小时其对输沙能力的影响较小，但随着坡度的增加其影响逐渐增大并接近流量。

表 2 不同近地表水流饱和深度条件下输沙能力与流量及坡度的回归系数

Table 2 Regression parameters of sediment transport capacity with slope and flow relative to subsurface water saturation depth

近地表水流饱和深度 Subsurface water saturated depth/cm	回归系数			Prob>F 值 Prob>F values	决定系数 R^2 Determination coefficients
	Regression parameters				
	k	β	γ		
5	269.83	1.14	0.68	4.99E-7	0.98
10	406.33	1.14	0.57	3.36E-7	0.98
15	515.34	1.16	0.54	4.29E-7	0.98

3.2 近地表水流对输沙能力的影响

近地表水流的存在会提高土壤的前期含水量，降低土壤团聚间的黏聚力，使得土壤的临界剪切力

减小^[26]，而输沙能力与土壤的临界剪切力呈负相关关系^[25]，因此土壤近地表水流使输沙能力增大。近地表水流饱和深度的变化对地表水流输沙能力产生

显著影响。与丁琳桥等^[24]测量的输沙能力相比，随着近地表水流饱和和深度的升高，紫色土细沟水流的输沙能力增加了 0.22 倍~1.28 倍，这是因为：（1）随着水流饱和深度的上升，地表径流的入渗量减小，更多的地表径流用来输移泥沙，从而使输沙能力增大；（2）近地表水流具有向上出流的趋势与浮力，这种趋势会克服重力对土壤颗粒的作用，进一步降低土壤颗粒间的黏结作用，使得土壤颗粒易被剥蚀搬运^[4]，而近地表水流饱和深度的增加会加剧近地表水流向上出流的趋势，使输沙能力增大。

Nouwakpo 和 Huang^[18]的研究结果表明细沟发育速率受到近地表水流的影响。近地表水流存在条件下细沟的侵蚀速率是排水条件下的两倍。由本试验可知，随着近地表水流饱和深度的升高，地表径流的最大含沙量增大，输沙能力增大，在相同的时间内径流带走泥沙量增多，这使得细沟的侵蚀速率加快。Gut^[30]发现输沙能力随平均水流流速的增加而增加。而当近地表水流接近地表时细沟水流的流速增加了 17%~88%^[20]。这是因为近地表水流使土壤剥蚀所消耗的能量减小，有更多的能量用于泥沙的搬移与输移，细沟水流的流速与输沙能力增大。

由表 2 可知随着水流饱和深度的变化，流量系数 β 和坡度系数 γ 并未发生显著变化，而系数 k 随着水流饱和深度的增加而显著增加。系数 k 代表其他因素，如降雨强度、土壤颗粒的粒径、土壤可蚀性、入渗率、表面糙度以及植被覆盖的变化对输沙能力的影响^[29]。这表明近地表水流饱和深度与坡度和流量的交互作用，可能不是细沟水流输沙能力增大的主要影响因素。流量与坡度的变化主要影响径流动能输入的大小，坡度升高，流量增大均会使径流动能增大，从而使径流的输沙能力增大。而近地表水流则是通过减小土壤的临界剪切力使地表径流的输沙能力增大^[3]。两者分别从增大径流动能与减小径流动能消耗两个方面来影响输沙能力。

4 结 论

输沙能力与坡度、流量以及近地表水流饱和深度呈正相关关系，但随着影响因素的增大，输沙能力的增长幅度降低。水流饱和深度是近地表水流影响地表径流输沙能力的重要因素，与输沙能力呈指数关系。同时，建立坡度、流量以及近地表水流饱

和深度与输沙能力间的关系方程，决定系数为 0.98。近地表水流存在时，流量与坡度间存在明显的交互作用，水流饱和深度与流量间也存在交互作用。因此，在紫色土坡耕地水土流失防治及土壤侵蚀预测模型相关研究中，应认识到近地表水流的重要性，以提高防治措施的合理性与预测模型的精准性。

参考文献 (References)

- [1] Feng X J, Zheng Z C, Li T X, et al. Characteristics of nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during maize growth stage under rainstorm[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (4): 738—749. [冯小杰, 郑子成, 李廷轩, 等. 暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (4): 738—749.]
- [2] Huang Y C, Chen X Y, Han Z, et al. Quantitative calculation of matrix infiltration and preferential infiltration in the tillage layer of purple soil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16 (5): 30—39. [黄永超, 陈晓燕, 韩珍, 等. 紫色土耕层土壤基质与优先流入渗的定量计算[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16 (5): 30—39.]
- [3] Zhang J, Lei T W, Qu L Q, et al. Method to measure soil matrix infiltration in forest soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 241—248.
- [4] Nouwakpo S K, Huang C H, Bowling L, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (6): 1914—1921
- [5] Huang C H, Laften J M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (2): 408—416
- [6] Fox G A, Wilson G V, Periketi R K, et al. Sediment transport model for seepage erosion of streambank sediment[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11 (6): 603—611
- [7] Rockwell D L. The influence of groundwater on surface flow erosion processes during a rainstorm[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2002, 27(5): 495—514
- [8] Zhang G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29 (2): 151—158. [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.]
- [9] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Answers: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23 (4): 938—944
- [10] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water

- erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32 (5): 1587—1593
- [11] Yu B F, Rose C W, Ciesiolka C A A, et al. Toward a framework for runoff and soil loss prediction using GUEST technology[J]. Soil Research, 1997, 35 (5): 1191—1212
- [12] Zhang G H, Wang L L, Tang K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56 (7): 1289—1299
- [13] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (4): 476—482. [雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39 (4): 476—482.]
- [14] Zhang Q W, Lei T W, Huang X J. Quantifying the sediment transport capacity in eroding rills using a REE tracing method[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28 (2): 591—601
- [15] Jiang F S, Gao P Y, Si X J, et al. Modelling the sediment transport capacity of flows in steep nonerodible rills[J]. Hydrological Processes, 2018, 32 (26): 3852—3865
- [16] Zhang Q W, Lei T W, Gao P L, et al. An analytic method for determining transport capacity of concentrated flow in eroding rills[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37 (5): 699—703. [张晴雯, 雷廷武, 高佩玲, 等. 黄土区细沟侵蚀过程中输沙能力确定的解析法[J]. 中国农业科学, 2004, 37 (5): 699—703.]
- [17] 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
- [18] Nouwakpo S K, Huang C H. The role of subsurface hydrology in soil erosion and channel network development on a laboratory hillslope[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76 (4): 1197—1211.
- [19] Gao X F, Li F H, Chen C, et al. Effects of thawed depth on the sediment transport capacity by melt water on partially thawed black soil slope[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30 (1): 84—93
- [20] Huang Y H, Chen X Y, Li F H, et al. Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 304—311
- [21] Zhu L J, Zhang G H, Ren Z P. Comparing four methods for soil infiltration measurement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32 (6): 163—167. [朱良君, 张光辉, 任宗萍. 4种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32 (6): 163—167.]
- [22] Wang H L, Jiang S Y, Cui J F, et al. Quantitative evaluation of macropore flow in purple soil of sloping cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (22): 167—174. [王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (22): 167—174.]
- [23] Ding W B, Jiang G Y, Shi D M, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (19): 6480—6493. [丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37 (19): 6480—6493.]
- [24] Ding L Q, Chen X Y, Zhao Y, et al. Sediment transport capacity in eroding rill of purple soil slope[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, 38 (12): 102—107. [丁琳桥, 陈晓燕, 赵宇, 等. 紫色土细沟侵蚀输沙能力研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38 (12): 102—107.]
- [25] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. Rill erosion physical model[M]. Beijing: Science Press, 2009. [雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [26] Ziadat F M, Taimah A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24 (6): 582—590.
- [27] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 16 (2): 591—601.
- [28] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[J]. Iahs Publication, 1990: 189.
- [29] Prosser I P, Rustomji P. Sediment transport capacity relations for overland flow[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2000, 24 (2): 179—193.
- [30] Gut B T, Dickinson W T, Rudra R P, et al. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15 (2): 101—118.

(责任编辑: 檀满枝)