

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.017

紫色土细沟侵蚀输沙能力研究^①

丁琳桥¹, 陈晓燕^{1,2}, 赵宇¹, 黄钰涵¹, 罗帮林¹

1. 西南大学 资源环境学院/西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室/中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100

摘要: 本研究采用体积置换法获得的细沟水流含沙量随沟长变化的过程数据, 估算得到不同水力条件下的最大含沙量, 进而计算水流的输沙能力. 实验采用不同坡度(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)、流量(2, 4, 8 min/L), 测量紫色土细沟侵蚀输沙数据, 分别采用细沟侵蚀含沙量随沟长变化的输沙过程的实测和拟合最大含沙量、细沟侵蚀剥蚀率为 0 时的含沙量 3 种方法确定紫色土细沟水流的输沙能力. 结果显示, 输沙能力随流量呈线性增加, 随坡度呈对数增大, 流量较坡度对输沙能力的影响更大. 同一坡度下, 流量越大, 输沙量趋于输沙能力所需的沟长越短; 同一流量下, 坡度 5°~15°时, 坡度越大, 输沙量趋于输沙能力所需沟长越短, 坡度 15°~25°时, 输沙量趋于输沙能力所需沟长随坡度增加变化不大. 相关性分析可知, 3 种方法计算得到的输沙能力基本一致.

关键词: 紫色土; 细沟侵蚀; 输沙能力

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)12-0102-06

土壤侵蚀是全世界最严重的土地退化问题之一, 主要发生在反复耕作和无植被覆盖保护的坡耕地上^[1-4]. 据统计, 中国的坡耕地面积占全国耕地面积的 20%^[5]. 细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要组成部分, 是坡耕地表土和养分流失的重要原因, 也是河流泥沙的主要来源^[6-9]. 土壤的剥蚀、搬运、沉积主要取决于水流的输沙能力, 水流的输沙能力一直是土壤侵蚀界关注的重点. 几乎所有常用的基于物理过程的侵蚀模型中, 输沙能力都是其中重要的参数, 但输沙能力的取值困难限制了细沟侵蚀预报模型在实际中的应用^[10]. 长期以来国内外学者对输沙能力进行了大量的研究, 认为坡度和流量是制约输沙能力的主要因子, 作为研究细沟水流输沙能力的基本参数. Beasley^[11]等通过研究不同坡度流量下的输沙能力, 提出了利用坡度和流量计算输沙能力的公式. Julien 和 Simons^[12]在维数分析的基础上, 提出了输沙能力与坡度、流量、剪切应力和降雨强度之间呈幂函数关系的表达式. 雷廷武、张晴雯和闫丽娟^[13-15]通过室内水槽试验, 提出了输沙能力与坡度、流量的线性关系和预测输沙能力的方程. Hessel 和 Jetten^[16]在能量耗散理论的基础上, 提出了用 4 种不同的方法计算输沙能力. Polyakov^[17]等利用壤土研究在净分离和净沉积条件下细沟侵蚀的水流输沙能力. 王莎^[18]、袁殷^[19]等通过细沟水槽试验方法, 提出了坡度、流量与输沙能力的二元幂函数方程. 但由于细沟侵蚀机制和侵蚀过程的复杂性, 到目前还没有提出被广泛接受的计算水流输沙能力的公式和方法.

1 输沙能力的计算

本研究采用黄钰涵^[20-21]等报道的室内细沟侵蚀试验数据, 采用不同的方法, 计算得到不同水力条件下紫色土细沟侵蚀输沙能力. 试验土壤为西南灰棕紫泥土. 试验涉及 5 个坡度: 5°, 10°, 15°, 20°, 25°.

① 收稿日期: 2015-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571265, 41271291); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(K318009902-1312); 重庆市研究生科研创新项目(CYS14054); 西南大学生态学重点学科“211”工程建设经费资助项目(2010CB95160402).

作者简介: 丁琳桥(1989-), 女, 河南周口人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究.

25°; 3 个流量 2, 4, 8 L/min. 在距细沟入口 ≤ 0.5 , $> 0.5 \sim 1$, $> 1 \sim 2$, $> 2 \sim 3$, $> 3 \sim 4$, $> 4 \sim 5$, $> 5 \sim 6$, $> 6 \sim 7$, $> 7 \sim 8$, $> 8 \sim 10$, $> 10 \sim 12$ m 间测量 11 段细沟侵蚀的体积后, 根据土壤质量密度计算得到侵蚀土壤的质量和由细沟水流入入口到给定位置间的累积侵蚀量, 进而计算得细沟侵蚀量分布和细沟侵蚀输沙过程. 由此计算细沟侵蚀输沙能力.

1.1 实测含沙量确定的输沙能力

根据已有的细沟侵蚀研究, 在稳定的集中水流条件下, 侵蚀产沙随沟长的增加而增加, 当细沟长度达到一定长度时, 细沟水流含沙量达到稳定或不再明显增加, 细沟水流输沙量趋于水流输沙能力, 与最大含沙量成比例, 即:

$$T_c = qc_{\max} \quad (1)$$

式中: T_c (kg/(m·s)) 为输沙能力; c_{\max} 实际试验中测量得到的细沟水流所能达到的最大含沙量 (kg/m³); $q = Q/w$ 为单宽流量 (m²/s).

1.2 拟合最大含沙量确定输沙能力

黄钰涵^[20]等紫色土细沟侵蚀模拟试验, 建立了含沙量与细沟沟长的非线性数学模型:

$$c = A(1 - e^{-Bx}) \quad (2)$$

式中: c (kg/m³) 为含沙量; x (m) 为细沟沟长; A (kg/m³) 为水流最大可能含沙量; B (1/m) 是水流含沙量随沟长增加速度的衰减速度. 由式(1)和式(2)得

$$T_c = qc_{\max} = Aq \quad (3)$$

1.3 解析剥蚀率确定输沙能力

土壤剥蚀率为细沟水流含沙量对距离的变化率和单宽流量之积^[14]:

$$D_r = q \frac{dc}{dx} \quad (4)$$

由(2)和(4)推导得到剥蚀率与含沙量的解析关系^[22]:

$$D_r = ABq - Bqc = d_2 + e_2c \quad (5)$$

细沟水流达到输沙能力时, $D_r = 0$, 由可以式(5)计算得到含沙量的最大值 C_{\max} :

$$d_2 + e_2c_{\max} = 0 \quad (6)$$

$$c_{\max} = -\frac{d_2}{e_2}q \quad (7)$$

将(7)式代入(1)得

$$T_c = qc_{\max} = -\frac{d_2}{e_2}q \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 输沙量与解析剥蚀率确定的输沙能力

对 5 个试验坡度与 3 个流量下的数据进行输沙量计算, 点绘出输沙量随细沟沟长的变化(图 1), 从不同水力条件下输沙量随细沟沟长的变化趋势可以看出, 坡度和流量对输沙能力都有影响, 但流量对输沙能力的影响更大. 尽管坡度和流量不同, 输沙量随细沟沟长的变化却表现出了相似的趋势: 一定坡度流量下, 产沙量随沟长的增加而增加, 但增加的幅度越来越小, 最后趋于由解析剥蚀率确定的输沙能力. 且同一坡度下, 流量越大, 输沙量趋于由解析剥蚀率确定的输沙能力所需的沟长越短; 同时, 在同一流量下, 坡度越大, 趋于由解析剥蚀率确定的输沙能力所需的沟长越短. 5°~15°输沙量随坡度的增加, 增加的幅度较大; 15°~25°输沙量随坡度几乎不增加. 出现上述现象的原因可能是因为坡度、流量越大, 细沟水流的能量越大, 其侵蚀动力也越大, 从而在水槽的上部产生较大的剥蚀率, 水流中的含沙量迅速增加到水流的输沙能力, 所需要的细沟沟长也较短.

由输沙量最后趋于解析剥蚀率确定的输沙能力, 从理论上证明了该试验对体积置换法获得的数据处理

方法, 即计算每段细沟的水流含沙量, 大于出口含沙量沟段的所有数据为泥沙沉积影响所致, 予以剔除, 将剔除部分的数据用出口处的含沙量替代, 该处理方法的正确性.

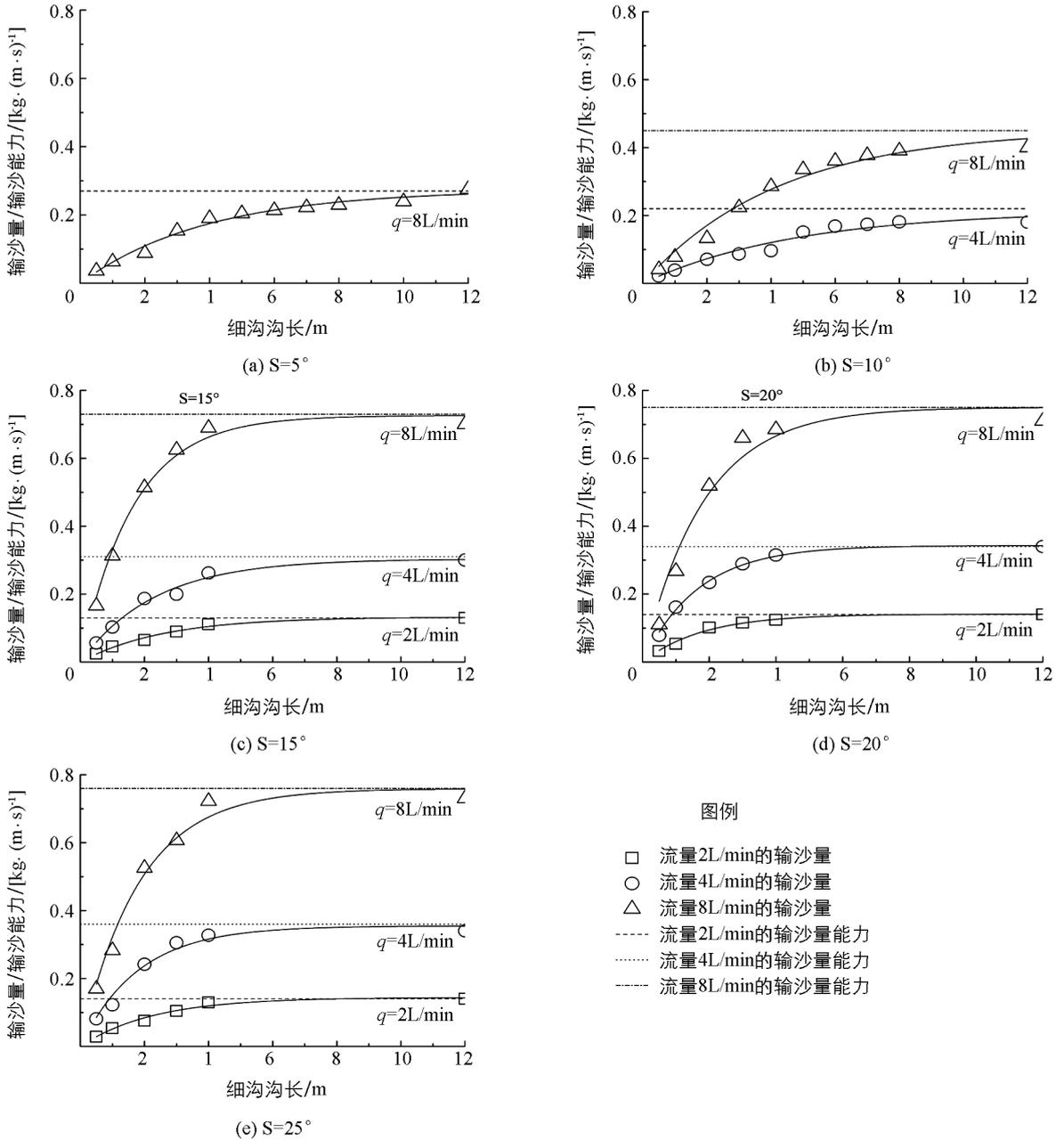


图 1 解析法计算得到的不同工况下的输沙能力

2.2 输沙能力的验证

本研究采用 3 种方法计算紫色土细沟水流的输沙能力, 即实测含沙量、拟合最大含沙量和细沟侵蚀剥蚀率为 0 时的含沙量确定的紫色土细沟水流的输沙能力. 3 种方法确定的输沙能力都随坡度和流量的增大而增大, 在同一流量, 坡度 5°~15°时, 输沙能力随坡度的增加而增大, 坡度 15°~25°时, 输沙能力随坡度趋于一个定值, 15°~20°是紫色土输沙能力变化的临界点(表 1).

对 3 种方法得到的输沙能力进行相关性分析(图 2). 图中用 $y=x$ 函数进行拟合得到实测值与解析值的拟合系数为 1.05, R^2 为 0.99; 实测值与试验值的拟合系数为 1.18, R^2 为 0.97; 以上分析结果说明由 3 种方法计算得到的输沙能力是相当的. 由图 2 中的数据分布及拟合系数 $1.18 > 1.05 > 1$ 可知, 3 种方法得到的输沙能力由大到小依次为: 拟合估算的输沙能力, 解析估算的输沙能力, 实测含沙量确定的输沙能力. 上述

3 种方法为输沙能力的计算提供了新的参考, 为坡面侵蚀过程参数的量化以及土壤侵蚀预报完全向物理模型转化提供了基础.

表 1 不同方法计算的输沙能力

坡度/ °	流量/ (L · min ⁻¹)	实测输沙能力/ [kg · (s · m) ⁻¹]	拟合估算输沙能力/ [kg · (s · m) ⁻¹]	解析估算输沙能力/ [kg · (s · m) ⁻¹]
5	8	0.28	0.27	0.27
10	4	0.18	0.22	0.21
	8	0.4	0.45	0.55
15	2	0.13	0.13	0.17
	4	0.3	0.31	0.39
	8	0.7	0.73	0.85
20	2	0.14	0.14	0.13
	4	0.34	0.34	0.38
	8	0.71	0.75	0.89
25	2	0.14	0.14	0.17
	4	0.34	0.36	0.42
	8	0.73	0.76	0.77

2.3 输沙能力与坡度和流量的关系

坡度和流量是影响细沟流量的重要因素, 输沙能力的大小取决于径流的能量. 对紫色土细沟输沙能力与坡度和流量的关系进行拟合见图 3 和图 4. 由图 3 和图 4 可以看出, 输沙能力随坡度和流量的增大而增大; 输沙能力随流量的增加呈线性增加, 坡度越大, 直线的斜率越大, 说明流量对输沙能力的影响越大; 输沙能力随坡度的增加呈对数增大, 且流量越大越明显. 对坡度和流量对紫色土输沙能力的影响进行相关性分析.

$$T_c = a + bS + cQ \quad (7)$$

式中: a , b 和 c 为回归系数; S 为坡度; Q 为流量. 且 $a = -0.37189$, $b = 0.01754$, $c = 0.08704$, 由 F 检验发现系数 b 和 c 在置信水平为 0.05 时分析结果有统计学意义, 说明坡度和流量对紫色土细沟输沙能力有极显著的影响, 流量较坡度对输沙能力的影响更大.

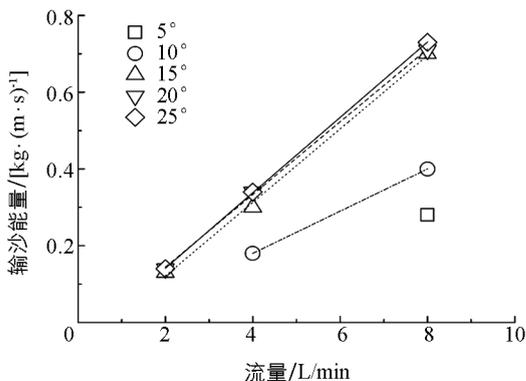


图 3 输沙能力和流量的关系

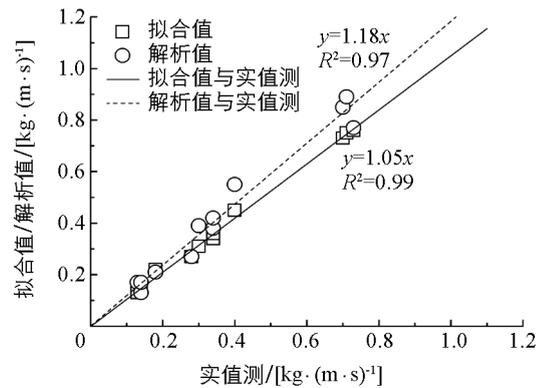


图 2 实测法与拟合法和解析法估算的输沙能力对比

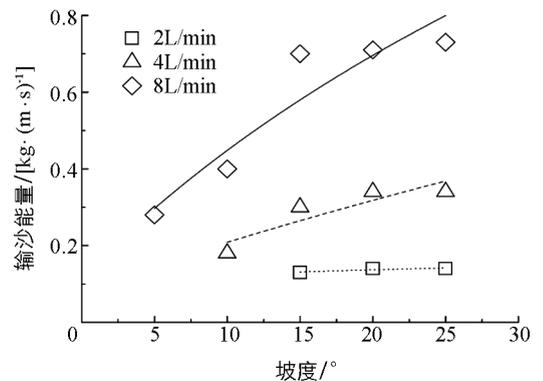


图 4 输沙能力和坡度的关系

3 结 论

本文用 3 种方法确定紫色土细沟水流的输沙能力, 即细沟侵蚀含沙量随沟长变化的输沙过程的实测和拟合最大含沙量、细沟侵蚀剥蚀率为 0 时的含沙量确定的紫色土细沟水流的输沙能力. 由输沙量最后趋于解析剥蚀率确定的输沙能力, 从理论上证明了该试验对体积置换法获得的数据处理方法的正确性. 同一坡度下, 输沙能力随流量的增大而增大, 流量越大, 输沙量趋于解析法确定的输沙能力所需的沟长越短; 在同一流量, 坡度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时, 输沙能力随坡度的增加而增大, 坡度越大, 趋于由解析剥蚀率确定的输沙能力所需的沟长越短, 坡度 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 时, 输沙能力随坡度趋于一个定值. 通过对 3 种方法得到的输沙能力进行相关性分析, 说明由上述 3 种方法计算得到的输沙能力是相当的. 对坡度和流量与输沙能力的关系进行拟合及相关性分析, 得到输沙能力随流量的增加呈线性增加, 随坡度的增加呈对数增大, 流量较坡度对输沙能力的影响更大. 本文提出的细沟输沙能力的计算方法可以为细沟侵蚀预报模型(WEPP)中相关参数(输沙能力)的计算提供参考, 从而使土壤侵蚀预报结果更加准确.

参考文献:

- [1] 霍洪江, 汪 涛, 魏世强, 等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(11): 112-117.
- [2] 康静雯, 陈晓燕, 赵 宇, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地产流产沙特征研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(3): 131-135.
- [3] 何丙辉, 郭 甜, 姚 军, 等. 紫色土坡耕地不同施肥水平下泥沙中氮、磷流失特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(7): 1-8.
- [4] 罗中杰, 李维一, 许泽宏, 等. 宜宾县金沙江流域水土流失与防治对策 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002, 25(2): 209-211.
- [5] ZHANG Q W, DONG Y Q, LEI T W, et al. Estimation of the Sediment Transport Capacity in Eroding Ephemeral Gullies with a Flume Experiment Method [J/OL]. Catena, 2015(9): 1-7 [2015-03-10]. <http://www.doc88.com/p-9913459642609.html>.
- [6] 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.
- [7] 王 库, 史学正, 于东升. 红壤丘陵区不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 697-701.
- [8] 黄 茹, 黄 林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(9): 119-126.
- [9] 陈 伟, 魏 虹, 李昌晓, 等. 三峡库区不同土地利用方式土壤肥力变化——以汝溪河流域为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(1): 96-100.
- [10] LEI T W, NEARING M A, HAGHIGHI K, et al. Rill Erosion and Morphological Evolution: A Simulation Model [J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157-3168.
- [11] BEASLEY D B, HUGGINS L F, MONKE E J. Modeling Sediment Yields from Agricultural Watersheds [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1982, 37(2): 113-117.
- [12] JULIEN P Y, SIMONS D B. Sediment Transport Capacity of Overland Flow [J]. Transactions of the Asae, 1985, 28(3): 755-762.
- [13] 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.
- [14] 雷廷武, 张晴雯, 赵 军, 等. 确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法 [J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 788-793.
- [15] 闫丽娟, 余新晓, 雷廷武, 等. 坡面流输沙能力与土壤可蚀性参数对细沟土壤侵蚀过程影响的有限元计算模型研究 [J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 192-200.
- [16] HESSEL R, JETTEN V. Suitability of Transport Equations in Modelling Soil Erosion for a Small Loess Plateau Catchment [J]. Engineering Geology, 2007, 91(1): 56-71.

- [17] POLYAKOV V O, NEARING M A. Sediment Transport in Rill Flow under Deposition and Detachment Conditions [J]. *Catena*, 2003, 51(1): 33–43.
- [18] 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.
- [19] 袁 殷, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟径流输沙过程实验研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 88–91.
- [21] HUANG Y H, CHEN X Y, LUO B L, et al. An Experimental Study of Rill Sediment Delivery in Purple Soil, Using the Volume-Replacement Method [J]. *PeerJ*, 2015, 3(1): 1–12 [2015–03–10]. <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0341816214003737>.
- [22] 黄钰涵, 陈晓燕, 丁琳桥, 等. 基于土槽冲刷法的紫色土侵蚀细沟剥蚀率研究 [J]. *土壤学报*, 2015, 53(3): 594–107.

Sediment Transport Capacity in Eroding Rill of Purple Soil Slope

DING Lin-qiao¹, CHEN Xiao-yan^{1,2}, ZHAO Yu¹,
HUANG Yu-han¹, LUO Bang-lin¹

1. School of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Region(Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau/

Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling Shannxi 712100, China

Abstract: This study uses the sediment load process data in the water flow along the eroding rill to estimate the maximum possible sediment concentration under different hydraulic conditions before the transport capacity was estimated. The sediment delivery data were obtained from laboratory experiments involving three flow rates (2, 4, 8 L/min) and five slope gradients (5°, 10°, 15°, 20°, 25°). Three methods were used to calculate the sediment transport capacity of rill flow, from the actually measured maximum sediment concentration, the fitted maximum value as well as that at zero detachment rate. The results showed that sediment transport capacity increased linearly with flow rate and exponentially with slope gradients. The flow rate had more profound impact on sediment transport capacity than the slope gradient. Under the same slope gradient, and the slope length for the sediment load to approach the sediment transport capacity became shorter with the increase in flow rate. Under the same flow rate, shorter rill length was needed for sediment load to approach the sediment transport capacity with the increased in slope gradient between 5°~15°, and the rill length for sediment load to approach the sediment transport capacity did not vary much under slopes of 15°~25°. There was very good consistency among the fitting relationships of three methods of calculating the sediment transport capacity.

Key words: purple soil; rill erosion; Transport capacity

责任编辑 陈绍兰

实习编辑 包 颖

