

坡面径流分离土壤的水动力学实验研究*

张光辉^{1,2} 刘宝元¹ 张科利¹

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

EXPERIMENTAL SIMULATION OF HYDRAULIC MECHANISM OF SOIL DETACHMENT BY SUFACE RUNOFF ON SLOPELAND

Zhang Guang-hui^{1,2} Liu Bao-yuan¹ Zhang Ke-li¹

(1 Department of Resource and Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling Shaanxi 712100)

关键词 土壤侵蚀, 分离过程, 水动力模拟

中图分类号 S157.1

土壤分离过程是指在降雨溅击和径流冲刷作用下, 土壤颗粒脱离土壤母质的过程^[1]。对因降雨溅击引起的土壤分离过程曾进行过深入系统的实验室模拟, 但对因径流冲刷引起的土壤分离过程, 并没有得到充分的研究^[2]。实验水槽内的水流动力特性与坡面径流的水动力学特征十分相似, 因而用变坡水槽可以对坡面流分离土壤过程的水动力学特征进行模拟。

1965 年 Lyle 和 Smerdon^[3] 首次用实验水槽对土壤分离速率与径流剪切力 (Shear stress) 间的关系进行了研究, 结果表明对特定土壤而言其关系是稳定的, 但实验结论是在恒定坡度下得出的, 并没有考虑坡度对土壤分离速率的影响。1991 年 Nearing^[2] 用变坡水槽模拟了水深、坡度与土壤分离速率间的定量关系, 研究发现土壤分离速率与水深、坡度间呈对数相关关系, 坡度对土壤分离速率的影响明显大于水深, 从而表明土壤分离速率既不是径流剪切力的函数, 又不是水流功率 (Stream power) 的函数。虽然 Nearing 的实验是在精密控制条件下进行的, 但实验坡度较小 (0.5% ~ 2.0%)。1999 年 Nearing^[4] 在野外条件下研究了土壤分离过程, 结果表明用水流功率更能准确地模拟土壤分离过程。

然而, 在目前国际上流行的土壤侵蚀物理模型中, 由径流冲刷所引起的土壤分离过程被定义为径流剪切力 ($\tau = \sqrt{HS}$)^[5]、水流功率 ($\omega = \sqrt{HSV}$)^[6] 或单位水流功率 ($P = \sqrt{VS}$)^[7]

* 国家自然科学基金项目 (40001014)、国家重点基础研究发展规划项目 (G200018602) 和黄土高原水土保持与生态环境建设实验示范项目联合资助

收稿日期: 2001-02-27; 收到修改稿日期: 2002-01-18

的线性函数,究竟哪一个水动力参数更能准确地描述土壤分离过程,或各自的适用范围如何,值得进一步研究。与缓坡相比,陡坡条件下的径流动力特性和侵蚀特征具有其特殊性^[4,8-12],研究陡坡条件下(特别是大于20%)坡面流分离土壤过程,对于校正、检验现有土壤侵蚀模型、分析陡坡土壤侵蚀特征及机理具有重要的理论意义。

土壤分离是产生侵蚀泥沙的必要途径,对其发生、发展的水动力学特征进行量化模拟,是建立土壤侵蚀模型的基础。本文的目的是在较大坡度和流量范围内,利用变坡水槽径流冲刷实验,分析土壤分离速率与流量、坡度、水深及平均流速间的相关关系,建立相应的预测方程,为土壤侵蚀物理模型的建立提供理论基础。

1 实验方法

1.1 供试土壤

试验土壤为取自北京市密云水库上游石匣小流域的普通褐土,粘粒、粉粒、砂粒含量分别为 236.4 g kg^{-1} 、 569.3 g kg^{-1} 、 167.7 g kg^{-1} ,有机质含量 2.95 g kg^{-1} 。试验前将土壤过 5 mm 的土壤筛,过筛后的土壤作为试验土样。

1.2 水动力参数的确定

试验是在长 5 m 、宽 0.4 m 的变坡水槽内进行,通过调整水槽上端高度可使水槽坡度在 $0.0\% \sim 60\%$ 间变化,试验水流通过 5 m^3 蓄水池、水管、水槽及沉沙池循环。水槽底部粘一层实验土壤,使水槽底部粗糙度与实验土壤地面粗糙度基本一致。

流量由阀门组控制,用数字型流量计监测。试验前调整水槽坡度和流量,水流稳定后测定水深。水深用精度为 0.02 mm 的测针测定,每个坡度和流量测定 12 次,去掉 1 个最大值和 1 个最小值,将剩余的 10 个水深平均获得该坡度和流量下的平均水深,水深测定在距水槽下端 $0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ 范围内进行。水流表面流速用染色法测定,记录染色水流流过距水槽下端 0.6 m 以上 2 m 长测速区所用的时间,用 2 除以时间得水流表面流速。与水深测定相类似,水流速度测定也重复 12 次,去掉 1 个最大值和 1 个最小值,将剩余 10 次平均获得平均水流表面流速。试验时监测水流温度,计算出水流雷诺数 ($Nr = RV/\nu$),将表面流速乘以 0.7 (过渡流) 和 0.8 (紊流)^[13],获得水流平均流速。

1.3 土壤分离速率测定

将试验土样用微型雾状喷水壶喷洒,使其含水量达到 18% ,然后在密封的塑料桶内放置 48 h ,以期土壤水分达到平衡。然后将土样装入直径为 10 cm 、深为 5 cm 的圆形有机玻璃筒内,控制土壤容重为 1200 kg m^{-3} ,将装好的土样放入铁皮盒内饱和,逐渐增加铁皮盒内水深(5次),直到水面低于土样表面 0.5 cm 时为止,保持水位 24 h 。试验开始前将试验样品装入水槽底部圆形土样室内(距水槽下端 0.6 m ,如图 1 所示。),尽量使土样表面与水槽底部保持同样高度。

土壤分离速率可表示为土壤流失量(试验前土样干重-试验后土样干重)除以试验时间和土样横截面积,因土壤流失的速率并不相同,因而调整试验时间使土壤下切深度尽量保持一致,以减少有机玻璃筒边缘引起的误差。试验采用了 5 个流量(0.25 、 0.5 、 1.0 、 1.5 和 2.0 L s^{-1})、6 个坡度(3.5% 、 8.8% 、 17.6% 、 26.8% 、 36.4% 和 46.6%)、

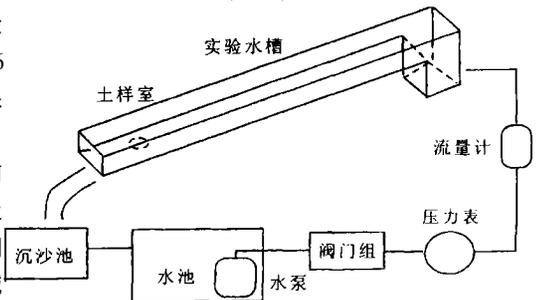


图 1 实验装置结构示意图

共 30 个组合, 每组试验重复 5 次。

2 实验结果

2.1 土壤分离速率与流量和坡度间的关系

土壤分离速率是流量和坡度的函数, 随着流量和坡度的增大, 土壤分离速率随之增大。从图 2 可以看出, 随着坡度的增大, 土壤分离速率基本呈线性增加, 这一趋势在大流量时(2 L s^{-1})更为明显。虽然土壤分离速率也随着流量的增大而增大, 但其变化趋势与坡度稍有不同, 图 3 表明坡度较小时, 随着流量的增大土壤分离速率呈幂函数形式增加, 随着坡度的增大, 流量对土壤分离速率的影响逐渐向线性逼近, 当坡度为 46.6% 时, 流量与土壤分离速率间完全呈线性关系。

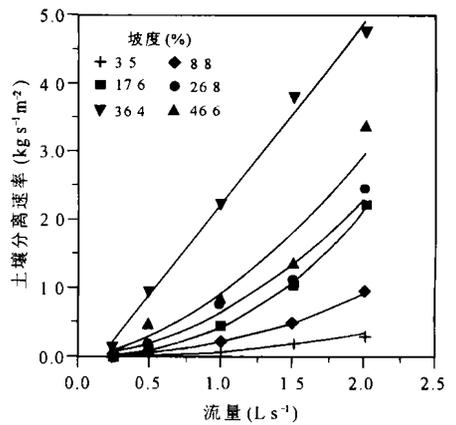
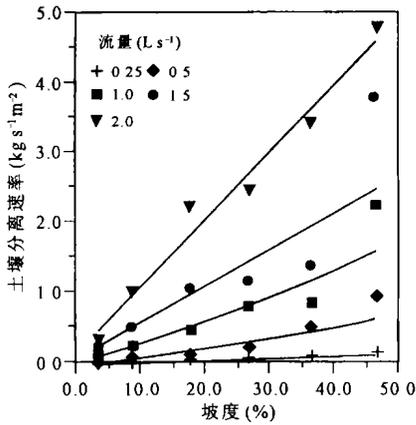


图 2 土壤分离速率与坡度的关系

图 3 土壤分离速率与流量的关系

将缓坡上(3.5%)的试验结果与 Nearing^[2]的试验资料进行比较后发现, 土壤分离速率与 Russell 土壤团粒直径为 0~ 1mm 和 1~ 2mm 的平均值相当, 当流量为 0.5 L s^{-1} 时, 水流剪切力 τ 为 1.45 Pa, 土壤分离速率为 $16.4 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, Nearing 的资料表明当水流剪切力为 1.47 Pa 时, 土壤分离速率为 $17.4 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 相对误差仅为 6%。比较的结果一方面表明本实验数据的准确性, 另一方面表明利用实验水槽模拟土壤分离速率的可重复性。

进一步分析表明, 当坡度较小时, 流量对土壤分离速率的影响大于坡度。当坡度为 8.8%、流量为 2 L s^{-1} 时, 水流剪切力为 6.3 Pa, 土壤分离速率为 $975 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$; 当坡度为 17.6%、流量为 0.25 L s^{-1} 时, 水流剪切力为 6.4 Pa, 但土壤分离速率仅为 $47 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。随着坡度的增大, 坡度对土壤分离速率的影响逐渐加强, 当坡度为 26.8%、流量为 2 L s^{-1} 时, 水流剪切力基本等于坡度为 46.6%、流量为 1 L s^{-1} 时的水流剪切力(分别为 13.9 和 13.2 Pa), 此时的土壤分离速率也比较相似, 分别为 2430.8 和 $2226.4 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 此时流量和坡度对土壤分离速率的影响比较接近。用逐步多元回归分析表明, 流量和坡度与土壤分离速率间呈幂函数关系:

$$D_r = 5.43 \times 10^6 q^{2.041} S^{1.268} \quad (1)$$

式中: D_r 为土壤分离速率($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$), q 为单宽流量($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$), S 为坡度(%), $R^2=0.97, n=30$ 。虽然利用(1)式模拟的土壤分离速率与实测值稍有差异,坡度为3.5%时模拟值有大于实测值的倾向,坡度为8.8%~36.4%时,模拟值稍小于实测值,坡度为46.6%时,模拟值又稍大于实测值,但总体而言,模拟值与实测值十分接近。

2.2 土壤分离速率与水深和坡度间的关系

与流量相类似,径流深度也是常用的水动力参数之一,Nearing^[2]曾对土壤分离速率与水深和坡度间的关系进行过系统的研究,结果表明土壤分离速率是水深和坡度的函数,但坡度对土壤分离速率的影响明显大于水深。图4给出了本实验土壤分离速率随水深的变化趋势,从图中可以看出,当坡度较小时(58.8%以下),坡度对土壤分离速率的影响明显大于水深,但随着坡度的增大,水深对土壤分离速率的影响逐渐加强,当坡度较大时(26.8%以上),水深的微小增加都会引起土壤分离速率的显著增加,从而表明此时坡度对土壤分离速率的影响小于水深,这一现象表明水深对土壤分离速率的影响与坡度密切相关。从而充分说明土壤分离速率既不是水流剪切力的函数,也不是水流功率的函数,因为如果土壤分离速率是水流剪切力或水流功率的函数,则水深和坡度对土壤分离速率的影响是相同的。与流量类似,水深和坡度与土壤分离速率间也呈幂函数关系:

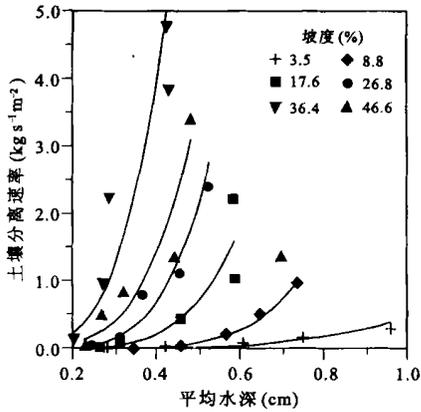


图4 水深与土壤分离速率的关系

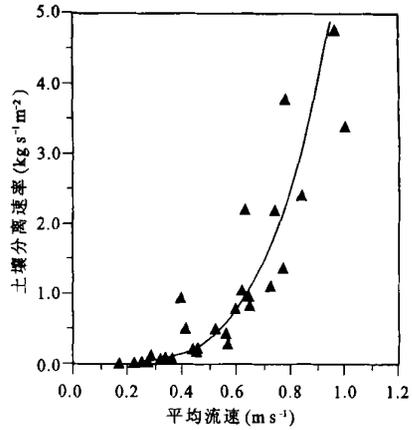


图5 平均流速与土壤分离速率的关系

$$D_r = 1.17 \times 10^3 h^{4.611} S^{2.370} \tag{2}$$

式中: D_r 为土壤分离速率($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$), h 为水深(m), S 为坡度(%), $R^2=0.92$ 。

2.3 土壤分离与坡面流平均流速间的关系

平均流速是坡面径流计算、土壤侵蚀预报中不可缺少的水动力参数,它是流量、坡度、地形地貌、下垫面情况等多种因素综合作用的结果,因而在土壤分离过程模拟中占有重要地位。对本实验资料进行分析后发现,平均流速与土壤分离速率间的关系十分密切,随着流速的增大,土壤分离速率呈幂函数形式迅速增加,其相关性远大于土壤分离速率与流量、坡度或水深等单个水动力参数,其关系可表示为:

$$D_r = 6.201 V^{4.117} \tag{3}$$

式中: D_r 为土壤分离速率 ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$), V 为平均流速 (m s^{-1}), $R^2 = 0.90$ 。(3) 式表明控制土壤分离速率的水动力参数为能量而不是力。(3) 式虽然形式简单, 但它具有重要的实用价值, 在没有详细的流量和坡度资料时, 可用(3) 式对土壤分离速率做出简单的评估, 尤其对人工模拟降雨试验和径流冲刷试验更是如此。

3 结 论

本文利用变坡水槽在较大坡度(3.5%~46.6%)和流量($(0.25 \sim 2.0) \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)范围内, 系统研究了土壤分离速率与流量、坡度、水深、平均流速等水动力学参数间的相关关系。试验结果表明: 土壤分离速率是流量、水深、坡度的函数, 随着流量和坡度的增大, 土壤分离速率随着增大, 流量对土壤分离速率的影响明显大于坡度, 利用流量和坡度的幂函数可以准确地预测土壤分离速率; 随着水深的增加, 土壤分离速率随着增大, 坡度较小时水深对土壤分离速率的影响小于坡度, 但水深对土壤分离速率的作用随着坡度的增大而增大, 当坡度较大时(26.8%以上), 水深的作用明显大于坡度; 平均流速与土壤分离速率呈密切的幂函数关系, 在没有流量和坡度资料的情况下, 可以利用流速对土壤分离速率进行评估。

致 谢 在实验过程中得到北京师范大学硕士生卫海燕和北京大学硕士生李建疆的帮助, 特表致谢。

参 考 文 献

- Owoputi L O, Stolte W J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. *Trans. ASAE*, 1995, 38(4): 1 099~ 1 110
- Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55(2): 339~ 344
- Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Trans. ASAE*, 1965, 8: 419~ 422
- Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, *et al.* Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surf. Process. Landforms*, 1999, 24: 677~ 686
- Nearing M A, Foster G R, Lane L J, *et al.* A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Trans. ASAE*, 1989, 32: 1 587~ 1 593
- Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill flow. *Water Resources Research*, 1992, 28: 245~ 250
- Morgan R P, Quinon J N, Smith R E, *et al.* The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Process. Landforms*, 1998, 23: 527~ 544
- Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surf. Process. Landforms*, 1992, 17: 515~ 528
- Grosh J L, Jarrett A R. Interrill erosion and runoff on very steep slopes. *Trans. ASAE*, 1994, 37(4): 1127~ 1133
- Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, *et al.* Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 1997, 33(4): 865~ 876
- 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. *土壤学报*, 2000, 37(1): 9~ 15
- 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95~ 103
- Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow. *Soil Technology*, 1992, 5: 289~ 301