

坡度对降雨径流挟沙能力影响的模拟试验

王照润¹, 高建恩^{1,2,3}, 周凡凡¹, 王 鹭¹, 张元元², 高 哲⁴, 李兴华⁴

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.水利部水土保持生态工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:高陡边坡降雨径流侵蚀输移能力是一个重要的科学问题。通过室内模拟降雨试验研究相同雨强不同坡度和坡长条件下的降雨径流侵蚀输移规律。结果表明:(1)试验条件下,水深与水力坡度的 $1/3$ 次方呈负相关,与坡长的 $3/5$ 次方呈正相关,流速与水力坡度和水深呈幂函数增加;(2)相同雨强裸坡条件下,径流含沙量与水力坡度的 $1/2$ 次方呈正相关,与坡长的 $4/5$ 次方呈正相关。水流挟沙能力约与水力坡度的 $1/2$ 次方呈正相关。(3)降雨径流的水流紊动扩散作用与重力作用的比值较明渠水流偏大,表明雨滴打击的紊动作用较明显,给出挟沙能力公式。与常用的河流泥沙挟沙能力公式比较,系数偏大,指数偏小。研究成果对深入分析降雨径流侵蚀输移的机制具有重要意义。

关键词:水力坡度; 流速; 水深; 径流含沙量; 水流挟沙能力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0097-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.015

Simulation Experimental Study on the Impact of Slope Gradients on Sediment Carrying Capacity of Rainfall Runoff

WANG Zhaorun¹, GAO Jianen^{1,2,3}, ZHOU Fanfan¹, WANG Lu¹,
ZHANG Yuanyuan², GAO Zhe⁴, LI Xinghua⁴

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Research Center on Soil & Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Rainfall runoff erosion transport capacity of high and steep slopes is an important scientific problem. The law of runoff erosion transport under the condition of the same rainfall intensity and different gradients and slope length was studied by indoor simulated rainfall experiment. The results showed that: (1) Under the test conditions, the flow depth was inversely proportional to the $1/3$ power of hydraulic gradient and directly proportional to the $3/5$ power of slope length, and the flow velocity increased in positive proportion to hydraulic gradient and flow depth. (2) Under the condition of bare slope with the same rain intensity, the runoff sediment concentration was directly proportional to the $1/2$ power of hydraulic gradient, was proportional to the $4/5$ power of the slope length. The sediment carrying capacity of water flow was directly proportional to the $1/2$ power of hydraulic gradient. (3) The ratio of the turbulent diffusion effect of rainfall runoff to the effect of gravity was larger than that of open channel flow, indicating that the turbulent effect of raindrops is more obvious, the formula of sediment carrying capacity is given. Compared with the commonly used formula of river sediment carrying capacity, the coefficient was larger and the index smaller. The research results are of great significance for in-depth analysis of the mechanism of rainfall-runoff erosion and transport.

Keywords: hydraulic gradient; velocity; flow depth; runoff sediment concentration; sediment carrying capacity of flow

收稿日期: 2022-05-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877078, 41371276); 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLF06-03-01); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900704, 2017YFC0504703)

第一作者: 王照润(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangzhaorun0513@126.com

通信作者: 高建恩(1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: gaojianen@126.com

水流挟沙能力是指在一定的水力边界条件下,水流处于平衡状态时携带的泥沙数量,通常以单位体积浑水中泥沙的数量(含沙量)表示。挟沙能力是径流侵蚀、泥沙输移的控制性参数之一,也是判别坡面挟沙水流是否发生冲刷、淤积或不冲不淤平衡输沙的重要依据。侵蚀输移能力的研究直接关系下垫面侵蚀输移强度、床面形态改变、侵蚀灾害类型、治理的规划等。因此,降雨径流侵蚀的挟沙能力研究不仅是侵蚀动力学领域重要的科学问题,而且也是流域治理中一个重要的技术问题,研究水流挟沙能力对侵蚀动力学的学科发展具有重要意义。

关于侵蚀输移能力的研究已有许多重要的成果,早先主要借鉴河流泥沙动力学中的相关研究成果,由于坡面径流受降雨打击和坡面糙度的双重影响,使得其挟沙能力与明渠水流的挟沙能力有所差异。Alonso 等^[1]在河流、水槽、凹形坡面上分析建立 9 种挟沙能力公式;Julien 等^[2]运用量纲分析建立坡面流挟沙能力的无量纲关系式,并通过对 14 种泥沙输移公式进行分析后提出挟沙能力与坡度、流量、剪切应力、降雨强度的幂函数关系表达式;张科利等^[3]通过对黄土坡面的水动力学机理及其输沙特性进行研究,提出估算侵蚀力的方法;费祥俊等^[4]提出黄土沟道输沙能力的计算方法。目前,大多数挟沙能力公式是国内外学者通过大量天然河道资料进行分析建立的半理论半经验公式^[5-6],这些公式从不同的角度出发取得很好的结果,丰富泥沙研究的理论和方法,但直接运用于坡面径流挟沙能力的计算时产生较大误差^[7-8]。坡面挟沙能力一方面受径流自身水动力学特性的影响,同时也受地表覆盖的制约,但影响挟沙能力的 2 个重要因素是坡度和流速这一结论得到多数学者^[2,9]的认可。在坡度对降雨径流挟沙力的研究方面,张光辉等^[10]、Govers 等^[9]、Nearing 等^[11]研究表明,流速主要受流量的控制,即坡度增加时流速呈增加的趋势,但这种趋势被随之而来的阻力增大所抵消,坡度对流速的影响不显著,坡面流挟沙力的大小主要受流量的影响;Rauws^[12]、Abrahams 等^[13]、张晴雯等^[14]研究表明,坡面上流速随坡度的增加而增加,坡度表征水流的能量耗散,与其阻力相关,与挟沙力的物理机制相联系,坡度是影响挟沙能力的主要因素。综上,不同研究者通过试验对坡面径流挟沙能的影响因子进行研究后得出的结论不尽相同,甚至完全相反。

本研究针对坡度对降雨径流侵蚀输移能力研究薄弱的问题,通过室内模拟降雨试验,研究坡度对含沙量、流速和水深的变化规律及其对坡面流挟沙能力的影响,给出降雨条件下坡面流挟沙能力与流速和水深等因子的经验公式,为构建坡面降雨径流侵蚀输移

的挟沙能力理论提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验于 2021 年 5—7 月在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验用土选用陕西延安羊圈沟的黄绵土,试验前采用激光粒度仪(Mastersizer 2000 型,英国 Malvern Instrument Ltd.)对其进行颗粒分析,供试土壤 $<0.002, 0.002 \sim 0.005, 0.005 \sim 0.01, 0.01 \sim 0.02, 0.02 \sim 0.05, 0.05 \sim 0.1, 0.1 \sim 0.2$ mm 粒径含量分别为 14.34%, 4.04%, 4.74%, 13.08%, 40.95%, 20.62%, 2.23%, 土壤粒径级配曲线见图 1。

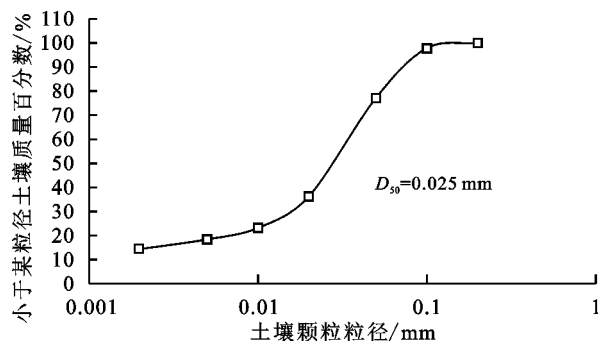


图 1 土壤粒径级配曲线

1.2 试验装置

试验采用下喷式降雨系统,降雨覆盖面积为 27 m×18 m,降雨均匀度 $>80\%$,降雨高度为 18 m,以保证所有雨滴在落地之前都能达到终点速度^[15]。试验土槽采用 8 m×25 cm×15 cm(长×宽×高)的钢化玻璃土槽,将其放在可变坡的钢制土槽上。

1.3 试验设计

每次试验前按照试验设计,用 PVC 板将土槽分隔成不同坡长(1~8 m)的试验小区。试验降雨强度为 100 mm/h,试验设计包括 8 个坡长:1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 m;5 个坡度:3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 为消除降雨量的影响,每次试验将降雨量控制在 50 mm。

试验之前将土壤自然风干,过 10 mm 筛,筛去土中的草根、石块和杂草等杂质。试验土槽底部铺 1 层医用纱布,以增加土壤与土槽之间的粗糙度。装土时采用分层装土,每层装土深度为 5 cm,共 2 层,土壤容重控制在 1.2 g/cm³,土壤初始含水率为 14%。填土时采用边填充边压实的方法,以减小边界效应的影响。为保证每次试验前下垫面地表状况均一,试验前 1 天采用 30 mm/h 降雨强度进行前期降雨,至坡面出现产流为止。为确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求,每次试验开始前对降雨强度进行率定,当试验雨强与设计雨强误差不超过 5% 时开始正式降雨试验。降雨开始后,用温度计测量水流的温度以计算水流黏滞系数,坡面产流时记录每个坡长的产流时

间,产流开始后以 2 min 为 1 个时间段用塑料桶采集径流泥沙样品,每场降雨在开始产流后持续 30 min,共可收集 15 个径流泥沙样;坡面径流表层流速采用染色剂法(KMnO_4)测定,设计流速区间为 1 m,以断面表层流速乘以修正系数 0.75 作为断面的平均流速^[16]。降雨结束后测量采集的浑水体积得到径流量,并将采样桶静置,直至泥沙全部沉淀,倒去上部清水,采用烘干法(105 ℃,24 h)测得每次的产沙量,每个时段的产沙量除以对应时段的径流量即可得该时段的径流含沙量,取每场试验的含沙量平均值作为最终试验结果。

1.4 数据获取

坡面径流深度浅且易受降雨及下垫面等因素的扰动影响,难以对其进行准确测定,由于过水断面近似为矩形,可根据水流连续性方程计算水深,计算公式为:

$$h = \frac{Q}{VBt}$$
 (1)

式中: h 为水深(m); Q 为 t 时间内的径流量(m^3); B 为过水断面宽度(m); t 为径流取样时间(s)。

泥沙沉速(ω)选用张瑞瑾公式^[17],该公式可以同时满足层流区、紊流区及过渡区的要求。

$$\omega = \sqrt{(c_1 \frac{\nu}{d})^2 + c_2 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd} - c_1 \frac{\nu}{d}$$
 (2)

式中: γ_s 为泥沙容重(kg/m^3); γ 为清水容重(kg/m^3); c_1 、 c_2 为按实测资料确定的无因次系数。

在本试验设计的降雨条件、下垫面、土壤质地等条件下,不同坡度和坡长的坡面降雨径流示意图 2。

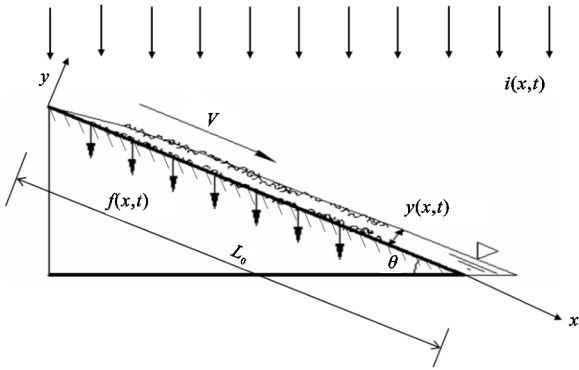


图 2 坡面降雨径流示意

2 结果与分析

2.1 坡度对降雨径流平均水深的影响

水深作为常用的坡面流水动力基本参数之一,同时也是影响径流能量的重要参数,研究径流深的变化规律对揭示径流侵蚀动力学机理有重要作用。根据试验结果,不同坡长下水深随水力坡度的变化关系见图 3。由图 3 可知,相同坡度时,水深随着坡长的增加呈增加趋势,坡长相同时,水深随着水力坡度的增

加而减小,坡度由 3°增加至 15°时,坡长 1~8 m 下水深分别减小 0.115,0.166,0.303,0.380,0.379,0.360,0.365,0.429 mm。可见,试验条件下随着坡长的增大,坡度等值增加时,水深呈波动减小趋势;坡长由 1 m 增加至 8 m,坡度 3°~15°时,水深分别增加 0.752,0.657,0.616,0.509,0.438 mm,坡度 3°时的水深增幅分别是 6°~15°的 1.14,1.22,1.48,1.72 倍,表明坡度增加使坡长对径流深的作用增强。水深受坡度和坡长的共同影响,通过进一步对水深与水力坡度和坡长之间的关系进行分析发现,试验条件下,流速与水力坡度、坡长的关系可用幂函数表示:

$$h = 0.12 \times 10^{-3} \times J^{-1/3} L^{3/5} (J \leq 0.3, L \leq 8 \text{ m})$$
 (3)

式中: h 为坡面流平均水深(m); J 为水力坡度,采用坡面比降近似代替。

$$J = \tan \theta$$

式中: θ 为坡度(°); L 为坡长(m)。

由公式(3)可知,坡面平均水深与水力坡度呈负相关,与坡长呈正相关,且由幂函数指数可知坡长对水深的影响大于水力坡度对水深的影响。降雨是影响坡面薄层径流的主要因素,由于本试验降雨强度和下垫面土壤一定,土壤原来的入渗性质在试验条件下基本不变,因此坡度相同,坡长增加引起径流量增加,可堵塞坡面下部土壤颗粒间的孔隙使得坡面径流入渗减弱,进而使得水深增加^[18];相同坡长条件下,随着坡度的增加水深逐渐减小。由公式(3)可知,水力坡度和坡长的幂函数指数均小于 1,则得坡长相同时,随着坡度的增加水深逐渐减小并到某一定值后趋向于相对稳定。由图 3 水深的变化趋势可知,随着坡度和坡长的逐渐变大,水深随着坡度的逐渐减小并在达到一定值后趋向稳定。

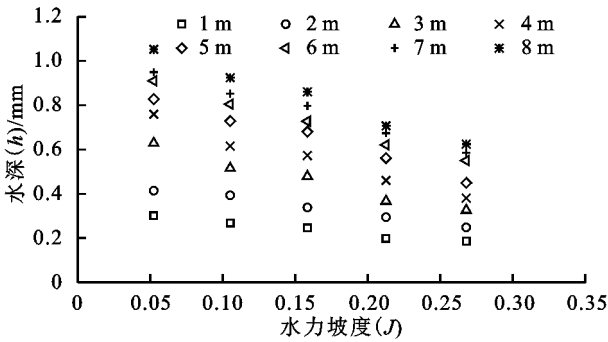


图 3 不同坡长下水深随水力坡度的变化

2.2 坡度对降雨径流平均流速的影响

坡面流流速是最基本也是最重要的水动力学参数,流速的大小直接关系到坡面土壤的分离以及泥沙的输移和沉积过程,前人^[13,19]研究中常用坡面径流流速来表示径流挟带和搬运泥沙的能力。根据传统水力学观点,无论是层流的谢才公式还是紊流的曼宁

公式,流速均被定义为水深和水力坡度的幂函数,根据降雨试验数据对坡面流流速与水深、水力坡度之间的关系进行分析得:

$$V=13.88(hJ)^{0.47}(J\leqslant 0.3)$$
 (4)

式中: V 为坡面流平均流速(m/s); h 为坡面流平均水深(m); J 为水力坡度, $J=\tan \theta$, θ 为坡度(°)。

试验条件下,由于降雨强度一定,相同坡长条件下流速主要受水力坡度的影响,随着试验坡度的增加,坡面流所受沿坡面向下的合力增大,则加速度随之增加,所以单位时间内的流速增大。从能量方面分析,随着试验坡度的增加,水流的重力势能也在增加,根据能量守恒原理,水流向下流动过程中,由重力势能转化为动能,动能增加则表现为流速加快。由图 4 可知,坡面流流速与水力坡度和水深的乘积呈幂函数增加,相同坡度时,随着坡长的增加,水深变大,流速呈增加趋势。同时,相同坡长条件,随着坡度的增加,流速及水力坡度均变大,但由流速计算公式(4)可知,随着坡度和坡长增加,坡面流流速的增加速率逐渐变缓,当增加到某一定值后流速变化缓慢,逐渐趋向稳定。由谢才公式可知,流速与水力半径和水力坡度乘积的 1/2 次方呈正比,流速公式(4)与曼宁公式相比,其幂函数指数偏小,这可能是由于降雨和床面糙度的双重影响下,使得坡面流的紊动作用更加剧烈。若将其幂函数指数近似为 1/2,则可得谢才系数(C)近似为 13.88,由曼宁公式和试验条件下的水深反算出糙率系数(n)在 0.017~0.021,与相当粗糙的混凝土面、连续淤积的黄土渠等类型河渠或管道壁面的粗糙系数(n)值相近^[20],基本上符合谢才公式。

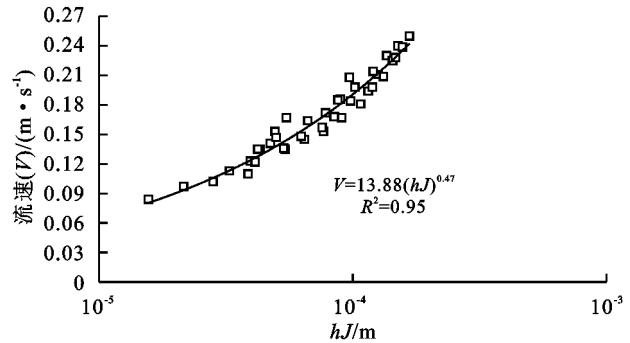


图 4 流速与水深和水力坡度乘积的关系

2.3 坡度对坡面降雨径流挟沙能力的影响

由图 5 可知,在降雨强度为 100 mm/h 时,坡度从 3°增加到 15°,坡长为 1,2,3,4,5,6,7,8 m 时对应的径流含沙量的增量分别为 15.74,26.86,36.39,65.44,95.49,63.27,58.07,55.53 kg/m³,分别增大 1.06,1.47,1.65,2.28,2.34,1.17,0.88,0.73 倍。由此可得,坡度从 3°增加到 15°,坡长在 5 m 时,含沙量增幅最大;坡长 > 5 m 时,含沙量虽逐渐增大,但增幅逐渐减小,可得径流含沙量的变化受坡度和坡长的双

重影响。进一步对含沙量随水力坡度和坡长的变化进行回归分析,得到三者之间的关系为:

$$S=49.89J^{1/2}L^{4/5}(R^2=0.95)$$
 (5)

式中: S 为含沙量(kg/m³); J 为水力坡度, $J=\tan \theta$, θ 为坡度(°); L 为坡长(m)。

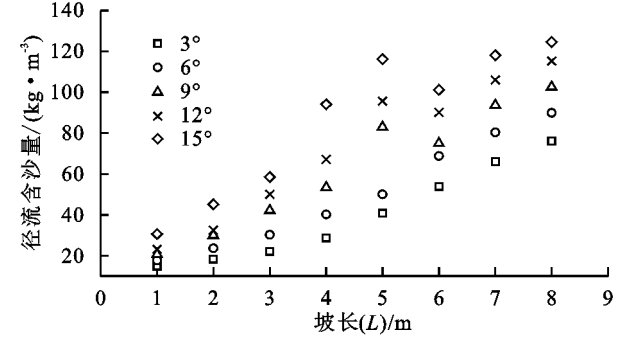


图 5 不同坡度下径流含沙量随坡长的变化趋势

由公式(5)可知,试验条件下坡度和坡长对径流含沙量均有影响,且坡长对径流含沙量的影响较高于坡度。为获得坡长对径流含沙量的影响规律,对不同坡度下径流含沙量随坡长的变化进行回归分析,得到表 1。由表 1 可知,含沙量与坡长之间可用 $S=AL^B$ 表示。式中: S 为径流含沙量(kg/m³); L 为坡长(m); A 为系数; B 为指数。幂函数关系表示,且随着坡度的增加系数逐渐增加,幂函数指数总体上呈减小趋势,说明坡度越大时含沙量达到相对稳定时所需的坡长越短,幂函数指数 < 1,坡长增大到某值时含沙量变化缓慢,逐渐趋向于某一稳定值。陈晓安等^[21]通过对坡长 20~60 m 3 个径流场的天然降雨进行分析,得到平均含沙量随坡长的增大先增大后趋向稳定;陈超等^[22]通过室内模拟降雨试验对东北黑土坡耕地坡面含沙量变化进行研究发现,含沙量随坡长的增加而增加,且增加的速率随坡长减小。

表 1 不同坡度时径流含沙量与坡长的关系

坡度/(°)	回归方程	判定系数(R^2)
3	$S=11.49L^{0.83}$	0.90
6	$S=14.62L^{0.82}$	0.94
9	$S=18.79L^{0.83}$	0.97
12	$S=21.21L^{0.83}$	0.97
15	$S=29.62L^{0.75}$	0.95

水流挟沙力是坡面处于不冲不淤平衡输沙时水流搬运泥沙的最大通量^[23],在自然条件下很难找到饱和的不冲不淤状态,只能根据冲淤变化不大的条件来建立所谓的冲淤平衡状态。当某一瞬间水体中的泥沙数量与水流挟沙能力相适应时,泥沙将正常输移,而河底处于动力平衡状态,即不发生冲刷和淤积,如果用 S_* 表示水流挟沙能力,则处于不冲不淤状态时 $S_* = S$ 。由图 5 可知,试验条件下坡面流含沙量处于非饱和向饱和状态过渡,随着坡长的逐渐延伸,

径流含沙量越接近饱和含沙量,即径流挟沙能力。已知坡长与含沙量的拟合方程式,可得坡度 $3\sim 15^\circ$ 时径流含沙量分别在坡长达到 18, 18, 17, 17, 16 m 时增加速率相对缓慢,可用此时的径流含沙量值近似为饱和含沙量,即水流挟沙能力。进一步对水流挟沙力与水力坡度之间的关系进行分析发现,坡面水流挟沙能力随水力坡度的增加而增加,两者呈幂函数关系,且随着水力坡度的增加水流挟沙能力的增幅逐渐减小(图 6)。

由于在一定的裸露地表和相同的降雨条件下,坡度的大小是影响径流挟沙力的最主要因素,随着坡度的增加,水流具有的势能增大,用于输移泥沙的能量越多,同时,坡度越大,土壤颗粒固有重力将更有利于分散土粒向下坡移动,同时降低土壤的稳定性,土壤抗蚀能力减弱^[14],与水平坡面相比坡面水层流速大,侵蚀物质能及时带走,更有利于下层土的冲刷,因此水流的挟沙能力越大。

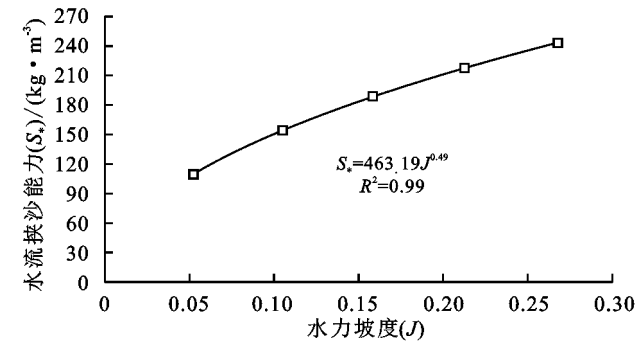


图 6 水流挟沙力随水力坡度的变化

2.4 坡面水流挟沙能力计算公式

2.4.1 水流挟沙能力计算公式的建立 坡面降雨径流运动过程中平衡是相对的,不平衡是绝对的。一般情况下,挟沙水流从超饱和状态通过淤积的方式向饱和状态发展,或者从次饱和状态通过冲刷方式向饱和状态发展,这种由不平衡向平衡发展的过程中含沙量是变化的,只有当这个过程结束以后,含沙量才与相应于水流挟沙能力的饱和含沙量相等。水流挟沙能力问题是一种复杂的非线性关系,水流挟沙能力(断面临界含沙量)(S_s)与断面平均流速(V)、平均水深(h)、泥沙沉速(ω)、重力加速度(g)、水的容重(γ)及泥沙容重(γ_s)等因素有关^[24],本试验中泥沙容重和水的容重基本不变,进而水流挟沙能力可以表示为:

$$S_s = f(V, h, g, \omega, J, \dots) \quad (6)$$

公式(6)中变量多且有量纲,运用 π 定律将(6)式中变量转化为无量纲参数, $V^2/(gh)$ 和 ω/V 都是无因次的因素综合体,因此, S_s 成为诸无因次综合体的函数。已有研究^[25]表明,多数水流挟沙力公式均含有水力的动力因素和泥沙的动力因素,共同之处在于决定水流挟沙力大小的最关键因素仍然是水流紊动

扩散作用与重力作用的对比关系 $[V^3/(gh\omega)]$, 其值越大,水流挟沙能力(临界含沙量)(S_s)也越大。由于水流携带的泥沙影响水流的物理性质及紊动结构,所以水流挟沙力对应的冲淤平衡是相对的,多数情况下坡面挟沙水流通过淤积或继续冲刷向不冲不淤的状态发展。已知随着坡度的增加,坡面流流速增加,水深减小, $V^3/(gh\omega)$ 随之增大,水流挟沙力(S_s)也随着坡度的增加而增大。对坡度、流速和水深对径流挟沙力的影响分析后通过试验数据进一步对无因次量 $V^3/(gh\omega)$ 与水流挟沙力的关系进行回归分析得图 7, 可得关系式为:

$$S_s = 5.36 \left(\frac{V^3}{gh\omega} \right)^{0.44} \quad (R^2 = 0.99) \quad (8)$$

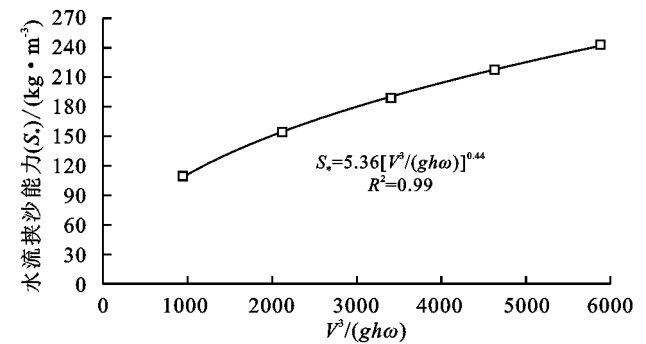
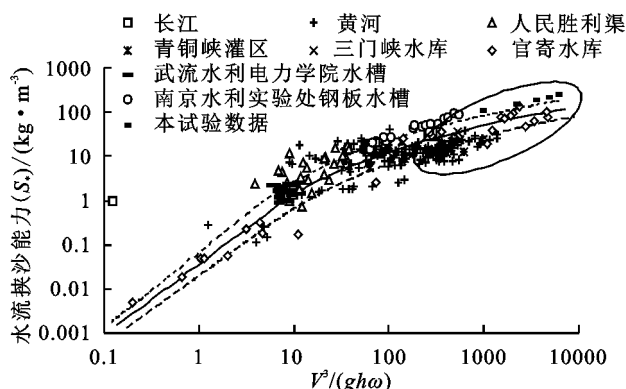


图 7 本试验 S_s 与 $V^3/(gh\omega)$ 关系曲线

2.4.2 水流挟沙能力计算公式的检验 坡面径流挟沙能力不仅与坡面径流水动力学特性密切相关,也受降雨、土壤、地形等因素的影响。为进一步研究挟沙力公式在坡面降雨径流上是否适用,将本试验数据点绘在武汉水利电力学院挟沙力公式与实测资料的对比图上^[26]。由图 8 可知,本试验的数据点群在外包线以外,表明坡面水流挟沙能力与明渠水流的挟沙能力有明显区别。相同的水力条件下,与明渠水流相比,在坡度和雨滴击溅的共同作用下坡面径流的水流紊动扩散作用与重力作用的对比关系更加明显,使得与一般明渠水流挟沙力相比,坡面径流挟沙能力有较大差异。

张瑞瑾等^[17]在研究水流挟沙力问题的过程中发现, S_s 与 $V^3/(gh\omega)$ 之间的关系可表达为 $S_s = K [V^3/(gh\omega)]^m$, 系数 K 、 m 不是常数,而是随 $V^3/(gh\omega)$ 改变的。为表达长江荆江河段的平均情况,取系数 K 、 m 分别为 0.07 和 1.14;为表达黄河干流河段的平均情况,取 K 、 m 分别为 0.22 和 0.76。本试验中由于水力坡度增大时流速越大,在坡面径流运动过程中,雨滴的击溅作用使得坡面流的扰动作用 $[V^2/(gh)]$ 增强,且试验水槽宽度较窄,水流受边壁的影响较大,使得由试验条件数据拟合得到的 K 、 m 的取值与明渠流不同,其值分别为 5.36 和 0.44。



注:图中水流挟沙力的曲线(中线)的上下的2条虚线分别表示淤积过程中和冲刷过程中的平均情况。

图8 实测资料与已有资料对比

3 讨论

坡度对径流深的影响主要通过改变坡面薄层径流水体的受力状况以及承雨面积而发生作用的。本试验中,随着坡度的增加水深逐渐减小,试验结果与张光辉等^[10]、刘青泉等^[27]的研究结果相同;刘俊娥等^[18]研究表明,在坡度 $<20^\circ$,随着坡度的增加流速增加,水流渗入土壤的机会减小,所以流量增加,水深增加,本试验结果与之相反。这可能是由于本试验坡长相同时,随着坡度的增加,坡面承雨面积减小,而刘俊娥等^[18]试验中由于投影坡长不变,则坡度增加时承雨面积反而增加,故所得结论不相同。试验条件下,水深与水力坡度的 $1/3$ 次方呈反比,随着坡度的增加,水力坡度的增幅较水深减小的幅度大,故表现为水深与水力坡度的乘积随坡度的增加而增大,坡面流平均流速随着坡度的增加而增加,试验结果与刘俊娥等^[18]研究结论相同。

试验条件下,随坡度的增加水流挟沙能力逐渐增加,且增加的幅度越来越小,增加到一定值后逐渐趋向于稳定,这与张晴雯等^[14]得到的结论一致;Govers等^[9]和 Nearing 等^[11]研究表明,坡面流速的大小主要受流量的影响,坡度对其影响不大,故水流挟沙能力受坡度影响不大。由上述分析可知,本试验条件下坡面流水深和流速均受坡度影响,故水流挟沙能力的大小受坡度的影响。坡面径流的挟沙能力不仅取决于坡面流的水力特性,在很大程度上还受到降雨击溅的扰动,坡面薄层径流水深极浅,且流路沿程多变,雨滴打击作用强烈,使得其紊动性 $[V^2/(gh)]$ 明显高于普通明渠水流,在相同的综合水力条件下,坡面径流的挟沙能力较明渠水流的挟沙能力大。李兴华^[28]研究发现,在坡度超过 5° 后,坡面径流受粗糙床面和降雨击打双重影响,雨滴打击与水流产生紊动向床面扩散,床面紊动朝水面扩散,这种双向扩散使得高陡边坡降雨径流运动具有特殊性,充分说明高陡边坡降雨径流与明渠水流存在显著性差异,故坡面径流挟沙能

力与明渠水流的挟沙能力也有较大差异。

4 结论

(1)试验条件下,水深与水力坡度的 $1/3$ 次方呈负相关,与坡长的 $3/5$ 次方呈正相关,流速与水力坡度和水深的乘积呈幂函数增加。坡度一定时,流速和水深在坡长增加到一定值时趋向稳定,变化趋势缓慢。

(2)坡面为裸坡,降雨强度 100 mm/h 条件下,坡面径流含沙量随坡度的增大呈增加趋势,坡长从 1 m 增加至 8 m 时,坡度 $3^\circ\sim 15^\circ$ 下径流含沙量增大 $0.73\sim 2.34$ 倍,径流含沙量与坡度的 $1/2$ 次方呈正相关,与坡长的 $4/5$ 次方呈正相关,坡长的影响较高于坡度。随着坡度的增加,径流含沙量达到饱和状态所需坡长越短,坡面水流挟沙力随坡度的增加而增加,两者呈幂函数关系。

(3)分析降雨径流侵蚀条件下 S_* 与 $V^3/(gh\omega)$ 之间的关系,得到降雨条件下的水流挟沙力计算公式可表达为 $S_* = 5.36[V^3/(gh\omega)]^{0.44}$,相关系数 R^2 为 0.99 。本试验条件下挟沙能力公式与常用的河流泥沙挟沙能力公式相比较,系数偏大,指数偏小,总体上相同的综合水力条件下,坡面降雨径流的挟沙能力大于明渠水流的挟沙能力。

参考文献:

- [1] Alonso C V, Neibling W H, Foster G R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling[J]. Transaction of the ASAE, 1981, 24(5): 1211-1220.
- [2] Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(3): 755-762.
- [3] 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[J].土壤学报, 2000, 37(1): 9-15.
- [4] 费祥俊,邵学军.泥沙源区沟道输沙能力的计算方法[J].泥沙研究, 2004(1): 1-8.
- [5] 余明辉,刘高峰.非均匀沙水流挟沙力公式的初步研究[J].泥沙研究, 2001(3): 25-29.
- [6] 费祥俊.悬移质水流挟沙能力与输沙特性[J].泥沙研究, 2003(3): 30-34.
- [7] 张光辉.国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J].水土保持学报, 2000, 14(3): 112-115.
- [8] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展, 2001, 12(3): 395-402.
- [9] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 11(5): 515-524.
- [10] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报, 2001, 15(1): 58-61.
- [11] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.

[11] 水利部黄河水利委员会.黄河流域水文资料.第 3 册,黄河中上游区上段(河口镇至龙门)[Z].郑州:水利部黄河水利委员会,1954—2018.

[12] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等.水文过程的基流分割方法研究进展[J].应用生态学报,2011,22(11):3073-3080.

[13] 李瑞,张士锋.两种自动基流分割方法在干旱半干旱地区的对比研究[J].地理科学进展,2017,36(7):864-872.

[14] 周嘉欣,丁永建,吴锦奎,等.基流分割方法在疏勒河上游流域的应用对比分析[J].冰川冻土,2019,41(6):1456-1466.

[15] 徐榕焄,王小刚,郑伟.基流分割方法研究进展[J].水土保持通报,2016,36(5):352-359.

[16] 王红瑞,刘达通,王成,等.基于季节调整和趋势分解的水文序列小波周期分析模型及其应用[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(5):823-836.

[17] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.

[18] 杨士娟.无定河流域基流分割与特性分析[D].浙江 金华:浙江师范大学,2007.

[19] 榆林市统计局.榆林统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019:196.

[20] 任宗萍,马勇勇,王友胜,等.无定河流域不同地貌区径流变化归因分析[J].生态学报,2019,39(12):4309-4318.

[21] 陈兆丰.无定河流域的水文特征[J].水文,1986(5):54-58.

[22] 夏露,毕如田,宋孝玉,等.硖瓦川流域河川基流变化规律及其驱动因素[J].生态学报,2021,41(21):8430-8442.

[23] 雷泳南,张晓萍,张建军,等.窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J].生态学报,2013,33(5):1559-1568.

[24] 赵栋.黄土高原典型流域基流分割及其演变驱动因素分析[D].郑州:郑州大学,2021.

[25] 李倩,李兰海,尚明,等.天山中段南北坡典型流域基流及其影响因素[J].干旱区研究,2015,32(1):29-34.

[26] 莫兴国,林忠辉,刘苏峡.气候变化对无定河流域生态水文过程的影响[J].生态学报,2007,27(12):4999-5007.

[27] 韩鹏,王艺璇,李岱峰.黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):505-521.

[28] 马雄德,范立民.榆神矿区地下水与生态环境演化特征[J].煤炭科学技术,2019,47(10):245-252.

[29] 孙胜祥.陕北风沙滩区浅层地下水环境演化和发展趋势[J].水科学与工程技术,2021(6):3-8.

[30] 杨泽元,王文科,黄金廷,等.陕北风沙滩地区生态安全地下水埋深研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(8):67-74.

(上接第 102 页)

[12] Rauws G. Laboratory experiments on resistance to overland flow due to composite roughness[J].Journal of Hydrology,1988,103(1/2):37-52.

[13] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona[J].Earth Surface Processes and Landforms,1996,21(1):35-47.

[14] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等.细沟侵蚀动力过程极限沟长试验研究[J].农业工程学报,2002,18(2):32-35.

[15] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.

[16] 左烽林,钟守琴,冉卓灵,等.紫色土丘陵区新改土坡面产流产沙及水动力学参数特征[J].水土保持学报,2018,32(1):59-66.

[17] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1998:48-55.

[18] 刘俊娥,王占礼,袁殷,等.黄土坡面薄层流产流过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):223-227.

[19] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient[J].Catena,2000,38(3):211-222.

[20] 朱首军,李占斌.水力学[M].北京:科学出版社,2013:75-79.

[21] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J].土壤通报,2011,42(3):721-725.

[22] 陈超,雷廷武,班云云,等.东北黑土坡耕地不同水力条件下坡长对土壤细沟侵蚀的影响[J].农业工程学报,2019,35(5):155-162.

[23] 开静芸.坡面流挟沙能力计算方法[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.

[24] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室.河流泥沙工程学.上册[M].北京:水利出版社,1981:138-163.

[25] 陈雪峰,陈立,李义天.高、中、低浓度挟沙水流挟沙力公式的对比分析[J].武汉水利电力大学学报,1999,32(5):1-5.

[26] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003:364-374.

[27] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,32(5):449-457.

[28] 李兴华.黄土高陡边坡降雨侵蚀径流运动过程及输沙规律研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.