

坡面含沙水流水动力学特性研究进展

罗榕婷¹, 张光辉^{1,2}, 曹 颖¹

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:坡面流是坡面侵蚀的主要动力之一, 具有独特的水动力学特性。本文对坡面含沙水流的流态、阻力系数、流速的测量与计算、径流能量以及含沙量对以上参数的影响进行了系统深入的论述。表征坡面流流态的参数有雷诺数与弗汝德数, 雷诺数研究的分歧点一般存在于对其“层流”的界定上, 降雨扰动是造成其流态特殊性的主要原因, 一般认为裸土上的清水坡面流弗汝德数大于 1, 较少的研究含沙水流流态的资料表明, 目前对含沙水流雷诺数的观点不一, 但多数学者认为含沙水流属于缓流范畴; 不同坡面试验所获得的阻力系数值不同, 影响阻力系数的因素有雷诺数、水深、弗汝德数、含沙量等, 在含沙水流中, 阻力系数与雷诺数、水深的关系复杂, 与弗汝德数呈负相关, 随含沙量的增加而增大; 测量坡面流流速的方法很多, 各自存在优缺点, 精密仪器暂不适合量测含沙水流, 用染色剂法测量坡面含沙水流的流速具有一定的可行性, 常采用坡度、流量的幂函数计算坡面流流速, 一般认为流速与含沙量呈反比; 能量是坡面流水动力学特性的综合体现, 一般认为随着含沙量的增加, 坡面流能量消耗呈增加趋势。在此基础上提出了目前研究中存在的不足之处, 为分析坡面侵蚀机理、完善坡面侵蚀模型提供理论依据。

关 键 词:坡面流; 流态; 阻力系数; 流速; 能量; 含沙量

1 引言

坡面流是坡面水蚀的主导动力之一, 它是指由降雨或融雪形成的, 并在重力作用下沿坡面流动的薄层水流。以山坡水文学、水力学、泥沙运动力学及河床演变理论为基础的水动力学模拟, 是分析坡面侵蚀过程动力学机制的经典方法^[1], 其中, 坡面流水动力学特性的研究尤为重要^[2]。但目前坡面流水动力学参数的量测、求解、相互间关系等研究, 多以清水冲刷试验模拟获得, 很少考虑含沙量的影响, 一定程度上限制了土壤侵蚀过程模型的建立。因此, 研究坡面含沙水流水动力学特性, 对分析坡面侵蚀机理、构建土壤侵蚀过程模型具有重要的意义。

2 研究方法的变化

坡面流的研究已有上百年的历史, 早期主要以经验性的描述为主, 20 世纪 30 年代以后正式进入定量描述阶段^[3], 但到目前为止尚没有建立成熟的坡面流理论, 对于坡面流水动力学特性的研究一般都借助明渠水力学的方法, 因此, 反映坡面流水动力特征的主要指标与明渠水流相仿, 有雷诺数、弗汝德数、阻力系数、流速、水深、含沙量等。

2.1 流态

2.1.1 雷诺数

雷诺数是判别层流和紊流的定量准则, 表征水流惯性力与粘性力比值的无量纲参数, 记作 Re 。 Re 的表达式是:

$$Re = \frac{VR}{v} \quad (1)$$

式中: V 为断面平均流速(m/s); R 为水力半径(m), 坡面流可用水深 h (m) 近似代替; v 为水流的运动粘性系数(m^2/s), 是水流温度的函数。

对于坡面流的临界雷诺数, 一般直接借鉴明渠水流的标准^[4], 下临界值为 500 或 575(管流 2320 的 1/4), 上临界雷诺数一般在 3000~10000 之间浮动, 根据两个临界值把流态依次分为层流、过渡流和紊流 3 种。

坡面流到底是层流还是紊流, 国内外学者存在不同的看法。代表性的观点有: Horton 认为坡面流处于一种混和状态, 是在完全紊流中点缀着层流^[5]; Woolhiser 等采用运动波模型对牧场小流域的多次暴雨资料分析表明, 坡面流流态可能是层流^[6]; Emmett 通过试验观察发现有人工降雨干扰的坡面流虽具有紊流特征, 但仍展现出较多层流性质, 这种水流不属于层流、紊流或过渡流的任意一种, 称其为“扰动流”(disturbed flow)^[7]; 江忠善等认为坡面流

收稿日期: 2009-01; 修订日期: 2009-03。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB407204)。

作者简介: 罗榕婷(1984-), 女, 福建福州人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀及其环境影响研究。E-mail: rongting_luo@126.com

通讯作者: 张光辉(1969-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 博导, E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

是介于层流与紊流之间的过渡流^[8]; Selby 认为坡面流是层流与紊流的混合^[9]; 吴长文等通过野外试验分析后认为, 在降雨条件下自然坡面水流保持层流的条件不存在, 坡面流不遵循雷诺规律, 是介于层流与紊流之间的一种特殊水流运动^[10]; 姚文艺通过实验室人工降雨试验发现, 当有降雨存在时坡面流可能是层流、紊流或过渡流, 根据 Re 及其与达西-韦斯巴赫阻力系数(f)关系所判别的层流与传统定义的层流概念并不相符, 因此对这种降雨扰动下的层流称为“伪层流”^[11]; 吴普特认为坡面流是一种特殊、复杂的层流, 因为其在外观形态上有许多小流水汇聚而形成的纹流, 称为“搅动层流”^[12]; 张光辉采用变坡试验水槽研究坡面流水动力学特性时发现, 坡面流的流态基本呈过渡流和紊流^[1]。另外, 由于下垫面糙率较大时的超临界坡面流兼有层流与紊流的特性, 对其流态的定义也暂不明确^[13-14]。

可见, 降雨扰动是造成坡面流流态特殊性的主要原因, 坡面流流态的分歧点大多集中在对其“层流”的界定上。以上结论都是采用公式(1)计算雷诺数, 但它只适用于清水或泥沙含量不大、粘性颗粒比例小的坡面流, 对于含沙水流, 泥沙含量对水流运动粘性系数 ν 有影响^[15], 若要计算含沙水流的雷诺数, 式(1)中的 ν 要用 ν_m 替代, 即浑水运动粘性系数 ν_m 可通过沙玉清公式计算: $\nu_m = \frac{\nu}{1 - \frac{S_v}{2\sqrt{d_{50}}}}$ (2)

式中: S_v 是体积含沙量百分数(%), d_{50} 是泥沙的中值粒径(mm)^[16]。国内部分学者采用式(2)对含沙水流雷诺数进行了初步研究。沙际德等发现若按明渠流一般标准, 粘性土坡面含沙水流已进入阻力平方区 ($Re > 500$), 但在坡度较缓且含沙量又很高时, 含沙水流处在紊动过渡区亦有可能, 但该文并未做专项研究^[17]; 潘成忠等研究发现草地含沙水流在大部分试验中为层流, 雷诺数 Re 随含沙量的增大而减小, 说明含沙量增大对水流粘性力的影响较惯性力大^[18]。国外, Abrahams 等研究表明, 在相同单宽流量 (除 $0.00160 \text{ m}^2/\text{s}$) 的清水、低含沙水流、高含沙水流 3 组试验中, 低含沙水流的雷诺数最大、高含沙水流的雷诺数最小, 但没有建立含沙量与雷诺数间的定量关系^[19]; Abrahams 等在建立粗糙地表坡面流泥沙输移方程时考虑了含沙量对雷诺数的影响, 认为坡面流属于紊流范畴^[20]。可见, 国内外学者关于坡面含沙水流流态的观点也有所不同, 含沙量与雷诺数的关系主要取决于含沙量对水流惯性力、粘性力的影响程度, 其中可能存在临界值, 有待于进一步分析研究。

2.1.2 弗汝德数

弗汝德数 Fr 也是表征水流流态的无量纲水力参数之一, 它是水流惯性力与重力的比值。其表达式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, 取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。一般将 Fr 是否大于 1 作为判别明渠水流急缓的标准, 当 $Fr < 1$, 水流是缓流; 当 $Fr = 1$ 是临界流; 当 $Fr > 1$ 则为急流。

对坡面流弗汝德数的研究分歧较少, 已有研究大多认为裸土上的清水坡面流为急流^[21-22]。Savat Poesen 发现坡度影响坡面流弗汝德数, 使其在 1~3.43 范围内变动^[23]; 郭雨华等认为坡面流 Fr 与土地利用相关^[2]; 敬向锋等研究发现受坡度、流量和床面粗糙度影响, 坡面流是一种在急流与缓流之间交替变化的“准临界流”^[24]; Sidorchuk 等采用数字摄影机观察坡面流流速与土壤颗粒输移关系时发现, 当流量在 $0.5 \sim 3.0 \text{ L/s}$ 间变化时, 坡面流弗汝德数的变化区间为 $0.8 \sim 2.1$, 除流量为 0.5 L/s 外, 其余都属于急流范畴^[25]。

目前对含沙水流急缓性的研究较少, 但多数学者认为坡面含沙水流属于缓流范畴。泥沙运动学的研究表明, 判断含沙水流急缓性的临界值为 $0.8 \sim 1.0$ 。沙际德等研究发现, 含沙水流走走跌跌, 急一阵, 缓一阵, 可视其为“准临界”流态, 对 Fr 的计算应考虑波高修正^[17]; Hu Shixiong 等在坡度为 5.5° 的动床上采用体积含沙量为 $0.016 \sim 0.04$ 的含沙水流进行冲刷试验后发现, Fr 变化区间为 $0.50 \sim 1.61$ ^[26]; 潘成忠等认为草地坡面含沙水流的 Fr 值变化于 $0.08 \sim 0.54$ 之间, 随坡度增大而增加, 从 Fr 介于 $0.8 \sim 1.0$ 判断, 坡面含沙水流为缓流^[27]。

2.2 坡面阻力

与明渠流一样, 达西-韦斯巴赫、谢才和曼宁方程也被广泛应用于坡面流流速计算^[28], 其中都包含了表征坡面阻力的指标。由于达西-韦斯巴赫阻力系数(f)公式表达具有良好的物理意义, 且符合量纲一致原则, 在已有坡面阻力研究中被广泛应用^[18]。其表达式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (4)$$

式中: J 为水流的能坡, 可采用坡面比降近似代替, 即 $J = \sin\theta$, θ 为坡度($^\circ$)。

20 世纪 70 年代以来, 对坡面阻力的研究主要有室内或室外模拟降雨、放水冲刷两种方法。Emmett 分别在光滑和粒径为 0.5 mm 的均匀砂床上用模拟降雨获得阻力系数为 $0.1 \sim 20$ 和 $0.3 \sim 5.0$, 坡度变化范围是 $0.33\% \sim 7.75\%$ ^[7]; Foster 等在 $1.7 \sim 5.16^\circ$ 坡度范围内模拟细沟时得到阻力系数小于 0.5 ^[29];

但Gilley等在与Foster试验相似的坡度下(2.0~5.6°)模拟细沟时,得到阻力系数在0.17~8.0之间^[30];Abranahms^[31-32]、姚文艺^[11]、吴普特^[12]、张科利^[21]、丁文峰等^[33]、张光辉^[1]等在不同条件下计算了特定条件下的阻力系数。但受试验设计、测量方法、土壤和地形条件差异的影响,不同研究者所获得的阻力系数不尽相同,缺乏可比性。早期对于坡面流阻力系数的研究大多集中在缓坡(<20°)上,陡坡资料较少,而近期的一些研究已涉及陡坡,如张光辉的试验坡度为5~25°^[1];郑良勇等的试验坡度为15~30°^[22]。

建立 Re 、植被覆盖、雨强、土壤理化性质等因子与阻力系数间的相关关系,也是坡面阻力研究的重要内容。其中研究较多的是 $f-Re$ 的关系^[34-36],一般认为二者间呈幂函数形式: $f=aRe^{-b}$,其中 a 、 b 为回归参数,其值都大于零,与地面特征、流态等有关。Woolhiser曾根据涨水径流过程线,确定出不同地表特征和流态下的 b 值^[34]。但随着研究的深入,人们发现坡面阻力与雷诺数之间并无显著关系。Roels^[36]和Abrahams等^[37]在系统分析 $f-Re$ 关系后发现,二者间既有正相关又有负相关。姚文艺在分析坡面阻力规律时发现,坡面阻力与雷诺数、坡度、雨强和地表粗糙度等因素密切相关^[11]。究其原因,可能是因为坡面阻力不单纯是由颗粒糙度和粘性力引起的颗粒阻力^[28],而是同时包括了颗粒阻力、形态阻力、波阻力和降雨阻力^[37]。Abrahams等^[37]和Hirsch^[38]的研究成果也表明,只有颗粒阻力 f_g 与 Re 间存在良好的幂函数关系($f_g=3.19Re^{-0.45}$)。

$f-Re$ 的关系随径流深、土壤颗粒组成、土壤类型、坡面形态和坡度等的变化而变化。当水深小于土壤颗粒粒径时, f 随 Re 的增大而增加,其原因是当水深增加时,土壤颗粒逐渐被淹没,浸湿面积增加,径流阻力增大,而一旦径流深超过土壤粒径时, f 便随 Re 的增大而减小^[22],这说明 $f-Re$ 关系直接受坡面形态的影响。Nearing等对4种不同土壤的试验结果表明, $f-Re$ 的关系随土壤的不同而由负相关(砂土)变为正相关(粉壤土)^[39]。张科利研究发现 $f-Re$ 的关系存在临界坡度的问题,在缓坡下二者呈负相关,陡坡下呈正相关,变化趋势发生转变的坡度大约在10~12°之间^[40]。可见, $f-Re$ 关系比较复杂,是很多因素综合影响的结果。

Lawrence采用淹没比替代 Re 来讨论坡面流阻力系数 f 的变化情况,间接反映了 $f-h$ 的关系。淹没比为平均水深与坡面平均糙率深度的比值,根据这一指标可将坡面流分为部分淹没、临界淹没与完全淹没3种情况。部分淹没时, $f-h$ 呈正相关;临界淹没与完全淹没时, $f-h$ 呈负相关^[41]。

在坡面流条件下对式(4)进行转化得: $f=8JFr^{-2}$,可见, $f-Fr$ 间存在一定关系。分析已有研究结果表明,在粗糙定床上坡面流阻力以波阻力为主^[37-38,42],阻力系数与弗汝德数呈负相关^[31,43-44]。Hu Shixiong等采用含沙水流动床试验研究坡面流阻力时发现,含沙水流的阻力系数由表面阻力 f_s 、形态阻力 f_f 、波阻力 f_w 和动床阻力 f_m (bed-mobility resistance)组成,其中后两者占69.4%,并与 Fr 呈幂函数关系: $f_{w+m}=0.63Fr^{-2[26]}$ 。

在含沙水流中,阻力系数的大小受含沙量的影响。Abrahams等在坡度为2.7°的沙质定床上研究含沙量对阻力系数、床面糙度的影响时,设置了3组试验,分别为清水、低含沙水流与高含沙水流。清水中的阻力为颗粒阻力 f_g ,含沙水流阻力由颗粒阻力 f_g 与输移阻力 f_i 组成,在相同流量下,输移阻力 f_i 随含沙量增加而增大,且在高含沙水流中所占比例明显大于低含沙水流^[19]。Hu Shixiong等同样采用阻力分割的方式对坡面阻力系数进行研究,发现含沙水流中存在清水坡面流中没有的动床阻力 f_m ,它与含沙量呈正相关,含沙量对其作用仅次于弗汝德数 Fr 和表征床面粗糙源的覆盖率 C_r ^[26]。潘成忠的研究也表明,缓坡下的坡面阻力随含沙量的增大而增大,而陡坡下二者的相关性较差^[18]。

2.3 流速

坡面流平均流速 V 和水深 h 不仅是主要水动力学参数,且是计算其他水动力学参数的基础^[45]。流速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,历来受到各国学者的重视^[46]。对于坡面流流速研究一般围绕着坡面流测定方法和流速公式展开。

测量坡面流流速的方法主要有染色剂法^[47]、盐溶液法^[48]、流量法等,还有一些以光学为基础(如摄影成像或激光技术等)并结合自动化技术的量测方法,如热成像流速仪^[49]、影像分析系统^[50]、二元光纤激光Doppler流速仪^[51]等,但这些精密仪器价格昂贵,日常维护费用高,并且使用条件苛刻,多用于量测清水流速,用于含沙水流流速测定的可行性和精确性仍值得探讨^[52]。本文对一些常用方法的优缺点做了简单的分析和总结(表1)^[12,48,53-54]。

测定坡面流流速最常用的方法是染色剂法,多数学者认为该方法获得的是坡面表面最大流速,要得到坡面平均流速就必须进行修正。常用的经验系数为平均流速与表面最大流速的比值 α 。Horton最早通过光滑河床试验和理论分析得到不同流态条件下 α 值,层流为0.67,过渡流为0.7,紊流为0.8^[3]。许多学者在其各自的试验中获得不同的 α 值^[48,55],

表 1 坡面流流速的测定方法

Tab.1 Measurement for velocity of overland flow

测定方法	原理	优点	缺点
染色剂法	一般用曙红，KMnO ₄ ，若丹明(Rhodamin)等低扩散率的染料，通过计算其扩散的距离和时间获得流速。	方法简单，使用方便；可同时进行雷诺模拟实验。	存在扩散现象，使得测试精度降低；存在操作者的人为误差；得到的是表层最大流速，需要对其进行修正。
盐溶液法 (电导法)	加入导电食盐溶液，测定各断面上的水的导电性变化来确定坡面流速。	计时与记录都是自动化的，减少人为误差；直接得到的就是平均速度	由于盐液的扩散作用，电导率峰值变化与水流速度不同步，该方法所得的平均流速没有明确的物理意义；注入盐液的剖面与监测站之间的距离的确定具有一定主观性；氯化钠对黏性土壤有影响，可能会使其发育结皮；仅适用于流路集中的水流或细沟水流，不适用于很浅的坡面径流。
流量法	测定坡面流量(Q)与水深(h)，结合水槽宽度(B),通过公式 $V=Q/(Bh)$ ，对各点求平均获得坡面流速。	不受泥沙含量变化的影响。	由于坡面流是薄层水流，水深很浅，测定较为困难。

并发现 α 不是一常数,它受床面糙度、坡度、流速、流量等因素的影响^[56-57]。Li Gang 等根据前人的经验,在坡度为 2.7~10°、雷诺数为 1900~12600 的条件下回归获得了 α 与坡度(S)、雷诺数(Re)的经验表达式:

$$\alpha=-0.251-0.327\log S+0.114\log Re \tag{5}$$

同时发现坡度的影响要大于雷诺数^[58]。但大部分研究很少探讨泥沙对 α 的定量影响,而在坡面侵蚀过程中,坡面流全为含沙水流,因而分析含沙量对经验系数的影响十分必要。

Li 等发现在过渡流与紊流中,经验系数不仅和 Re 有关,而且与含沙量有关^[59]。夏卫生等通过流量法和盐溶液示踪法比较发现,经验系数的平均值与泥沙含量具有较好的正相关性,且一定泥沙含量下的经验系数近似于恒定值,沙含量有减小示踪剂扩散率的作用^[60]。因此,运用染色剂法测定坡面含沙水流的流速仍具有一定的可行性。

坡面流流速的计算公式一般是通过建立流速与流量、坡度的关系获得^[1,8,29,61]。随着流量与坡度的增加,流速呈上升趋势。江忠善等收集国内外坡面流流速资料,将其关系概括为统一的形式: $V=Kq^nS^m$,其中, K 、 n 、 m 为参数,随试验条件不同而有

所差异,但均为正值^[8]。有学者研究发现,流速仅是流量的函数,与坡度相关性不大^[62-63]。虽然许多试验已经表明,采用流量、坡度的幂函数形式可以较好地模拟坡面流流速,但其中忽略了下垫面条件、含沙量等的影响,因此,也有学者提出的流速计算公式不仅包括了流量和坡度,同时还包括了水流比重、粘滞系数等^[31,64-65]。对于近年来学者提出的代表性观点,本文也做了相应的总结(表 2)。已有的坡面流流速公式多适用于计算坡面流的平均流速,无法反映流速在不同历时、断面上的具体情况,建立流速公式应考虑其时空变化的性质。

含沙量与流速间的关系研究较早,1914 年 Gilbert 通过试验发现,在相同流量条件下,含沙水流的平均流速要比清水的流速低^[66],但类似的研究很少^[67-68],这可能导致在流速计算时会忽略了含沙量的影响。而且,已有研究多为河道水流^[66-67],很少涉及到坡面流。Aziz 等研究发现,坡面流流速随含沙量的增加而减小^[69]。Abrahams 等认为在同一流量条件下,坡面流平均速度、平均颗粒输移速度、浑水速度都与含沙量呈负相关关系,并讨论了其内在机理:随着含沙量增加,用于搬运泥沙的水流能量增加,用于转化为径流动能的能量减少,导致水流

表 2 坡面流流速的计算公式

Tab.2 Formula for velocity of overland flow

研究者	径流类型	计算公式	参数意义	流量 (10 ⁻⁴ m ³ /s)	坡度/ $^{\circ}$	备注
Foster(1984) Guy(1987)	细沟流 坡面流	$V=16.0Q^{0.28}S^{0.48}$ $V=[\gamma S/(3\mu)]^{1/3}q^{2/3}$	Q 为流量; S 为坡度 γ 为水流比重; μ 为粘滞系数; q 为单宽流量	3.26~21.92 0.08~1.67	1.7~5.16 1.15~11.31	模拟细沟, 径流冲刷 模拟降雨, 野外试验
江忠善(1988) Govers(1992) 姚文艺(1993)	坡面流 细沟流 坡面流	$V=2.09q^{0.5}S^{0.35}$ $V=3.52Q^{0.294}$ $V=\frac{1}{f^{1/3}}[8gS(q+ix)]^{1/3}$	f 为阻力系数; i 为降雨强度; x 为沿水流方向距离	1.11~6.67 0.32~12.1 <61	3~25 2~8.1 3~15	野外试验 收集文献资料 模拟降雨, 室内试验
Abrahams(1996)	细沟流	$\log V=0.733+0.329\log Q-0.001+8\%G+0.18\log S-0.188\log M$	% G 为土壤中直径大于 2mm 颗粒百分数; M 为细沟糙率	5.55~21.94	0.76~3.2	模拟细沟, 野外试验
Nearing(1999) 张科利(2000) 张光辉(2002)	细沟流 细沟流 坡面流	$V=9.802Q^{0.459}$ $V=5.544Q^{0.2636}S^{0.2511}$ $V=23.66q^{0.342}S^{0.246}$		0.98~9.8 0.4~5 2.5~50	1.49~16.75 6~15 5~25	模拟细沟, 野外试验 模拟细沟, 室内试验 模拟细沟, 室内试验

速度降低;含沙量增加使颗粒间碰撞机率增大,颗粒动量在垂直方向上的分量增加,产生与推移质运动方向相反的力,降低了颗粒输移速度^[70]。

2.4 坡面流能量

能量是坡面流水动力学特性的综合体现。目前对坡面侵蚀动力中的降雨动能研究较为成熟,径流能量研究起步较晚。就表达坡面流能量的计算公式而言,国内外学者存在不同观点(表 3)。其中,应用最为广泛的是 Bagnold 提出的水流功率,它实际上表征了一定高度水体顺坡流动时所具有的势能,即径流势能^[71]。周佩华等也认为径流能量就是径流的

位能^[72],因此,现有的坡面流能量公式多以径流势能的形式存在^[73-75]。也有学者采用径流动能与势能相结合的方法来表示坡面流能量。但由于径流动能在坡面流能量中所占的比例很小^[76-77],因此,采用径流势能表征坡面流能量的方法仍占主导地位。

前已述及,含沙量的变化会影响坡面流水动力学参数,从而也会间接影响坡面流能量,但其定量关系尚不清楚。研究坡面侵蚀方式转换的临界能量时,一般认为随着含沙量的增加,坡面流能量消耗呈增加趋势^[77-78]。

表 3 坡面流能量计算公式
Tab.3 Formula for energy of overland flow

研究者	计算公式	参数意义
Bagnold(1966)	$\omega = \tau V = \gamma q S = \gamma h S V$	ω 为水流功率, τ 为水流剪切力, V 为坡面流流速, γ 为水流比重, S 为坡能比降
Lal R(1991)	$E_f = \rho g Q L \sin \theta$	E_f 为径流势能(J/m ²), ρ 是径流密度(kg/m ³), Q 是单位面积上的径流量, 相当于径流深(m), L 为坡长, θ 为坡度
赵鸿雁等(1993)	$E_p = 1/2 pr \times s \times g \times H$	E_p 为径流势能(J), pr 为径流深(mm), s 为坡面面积(m ²), H 为侵蚀基准点距坡面顶点的垂直距离(m), $H = L \sin \theta$
吴发启等(1998)	$E_f = \frac{\rho g}{4} L \times \sin^2 \theta \times P_h$	P_h 为净雨深(m), 即产流过程中的降雨量, 可用平均径流深来替代
雷阿林等(1998)	$\varepsilon = h + v^2/2g$	ε 是过水断面的单位能量, h 是水流深度, $v^2/2g$ 为测定动能的度量
李占斌等(2002)	$E_{x \varepsilon} = \rho q' g (L-X) \sin \theta + 1/2 \rho q' V_x^2$	$E_{x \varepsilon}$ 为经过坡面某一断面的实际单宽能量, q' 为坡面 X 断面处的径流量, V_x 为到坡顶的距离为 X 的坡面任意一点的水流平均流速

3 存在的主要问题

关于坡面流水动力学特性的研究虽然已取得不少成就,但在试验设备、量测技术与研究内容方面仍需进一步的加强与深入。

在试验设备、量测技术方面,常用的染色剂测量流速的方法存在许多缺点,不能精确测量流速是制约坡面流水动力学特性研究的重要因素,因此,投入技术研发一种能准确测量坡面流和高含沙水流流速的仪器显得至关重要。受试验目标、试验条件的影响,不同学者在试验方法、试验设备的选择上也存在较大差异,不同的方法侧重点不同,不同的设备误差范围也不同,导致不同学者获得的试验结论不尽相同。针对这方面的不足,应逐渐规范量测技术与设备选择标准,提高研究结果的可比性。

在研究内容方面,首先,坡面流作为三维、非恒定非均匀沿程变量流,流动形态千变万化,一般所获得的关于水动力学特性的结论都是整个坡面的平均情况,对这些参数在坡面侵蚀过程中的时空差异或分布规律研究较少,制约坡面侵蚀机理模型的建立。今后的研究应倾向坡面水流复杂运动过程,可以通过提高设备的精度、进行断面测量等方法实

现。其次,受目前研究水平的限制,在坡面流水动力学参数的量测、求解或预测中常常忽略了含沙量的作用,但从上述分析可知含沙量对每个水动力学参数都有影响,而且现实中的坡面流不可能是清水,全为含沙水流。不考虑含沙量的影响,不利于还原自然条件下真实的坡面侵蚀机理,也无法准确模拟土壤侵蚀过程并建立相应的模型。目前关于含沙量对坡面流水动力学参数影响的研究仍较少,加强该领域的研究具有重要的现实意义。再次,已有的大部分研究成果都是在缓坡条件下获得的,然而陡坡是我国水土保持研究的主要对象,随着坡度的增大,坡面流水动力学特性及侵蚀过程均会发生显著变化,因此,加强陡坡条件下坡面流水动力学特性研究或将已有的在缓坡条件下获得的研究成果,在陡坡条件下进行校正、检验,也将是未来坡面流水动力学研究的主要内容之一。

综上所述,坡面流水动力学特性的研究需要进一步加强,特别是在水动力学参数的选择、计算方法、临界值等方面,均没有系统考虑含沙量的影响,需要进一步深入系统的研究,从而为深入认识土壤侵蚀机理、建立土壤侵蚀过程模型,奠定理论基础。

参考文献

- [1] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002, 13(2): 159–165.
- [2] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究. 水土保持研究, 2006, 13(4): 264–267.
- [3] Horton R E, Leach H R, Van Vliet R. Laminar sheet flow. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393–404.
- [4] 陈椿庭. 关于明渠水流的六区流态. 人民长江, 1995, 26(3): 43–46.
- [5] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of American Bulletin, 1945, 56: 275–370.
- [6] Woolhiser D A, Hanson C L, Kuhlman A R. Overland flow on rangeland watersheds. Journal of Hydrology (N.Z.), 1970, 9(2): 336–356.
- [7] Emmett W W. Overland flow. In: Kirkby M J (ed.). Hillslope Hydrology. New York: John-Wiley and Sons, 1978: 145–176.
- [8] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究. 中国科学院西北水土保持所集刊, 1988, (7): 46–52.
- [9] Selby M J. Hillslope Materials & Processes. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [10] 吴长文, 王礼先. 林地坡面的水动力特性及其阻延地表径流的研究. 水土保持学报, 1995, 9(2): 32–38.
- [11] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究. 泥沙研究, 1996(1): 74–82.
- [12] 吴普特. 动力水蚀实验研究. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [13] Savat J. Resistance to flow in rough supercritical sheet flow. Earth Surface Processes and Landforms, 1980, 5(2): 103–122.
- [14] Nearing M. A probabilistic model of soil detachment by shallow flow. Transaction of American Society of Agricultural Engineering, 1991, 34: 81–85.
- [15] 庞重光, 杨作升, 张军. 黄河汛期泥沙分布特征及其对水流结构的影响. 泥沙研究, 2001(4): 47–52.
- [16] 沙玉清. 泥沙运动力学引论. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [17] 沙际德, 白清俊. 粘性土坡面细沟流的水力特性试验研究. 泥沙研究, 2001(6): 39–44.
- [18] 潘成忠. 坡面流水力学特性及其对草地拦沙的响应机制. [博士研究生学位论文]. 陕西杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2007.
- [19] Abrahams A D, Li G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(10): 953–960.
- [20] Abrahams A, Li G, Krishnan Ch, Atkinson J. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(13): 1443–1459.
- [21] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究. 泥沙研究, 1999, (1): 56–61.
- [22] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究. 水利学报, 2004, (5): 46–51.
- [23] 胡世雄, 靳长兴. 坡面动力侵蚀过程的实验研究进展. 地理科学进展, 1999, 18(2): 103–110.
- [24] 敬向锋, 吕宏兴, 张宽地, 等. 不同糙率坡面水力学特征的试验研究. 水土保持通报, 2007(2): 33–38.
- [25] Sidorchuk A, Schmidt J, Cooper G. Variability of shallow overland flow velocity and soil aggregate transport observed with digital videography. Hydrological Processes, 2008, 22(20): 4035–4048.
- [26] Shixiong Hu, Abrahams A D. Partitioning resistance to overland flow on rough mobile beds. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(10): 1280–1291.
- [27] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理. 水科学进展, 2007, 18(4): 490–495.
- [28] Smith M W, Cox N J, Bracken L J. Applying flow resistance equations to overland flows. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4): 363–387.
- [29] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics I: Velocity relationship. Transaction Of the ASAE, 1984, 27(3): 790–796.
- [30] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills. Transactions of ASAE, 1990, 33(6): 1900–1906.
- [31] Abrahams A D, Parsons A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces. Catena, 1994, 23: 111–140.
- [32] Abrahams A D, Li Gang, Parson A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope in southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 35–47.
- [33] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72–75.
- [34] Woolhiser D A, Liggett J A. Unsteady one-dimensional flow over a plane: The rising hydrograph. Water Resource Research, 1967, 3(3): 753–771.
- [35] Dunne T, Dietrich W E. Experimental study of Horton overland flow on tropical hillslopes, 2. Hydraulic characteristics and hillslopes. Z. Geomorphol. Suppl., 1980, 35: 60–80.
- [36] Roels J M. Flow resistance in concentrated overland flow on rough slop surface. Earth Surface Process and Landforms, 1984, 9: 541–551.
- [37] Abrahams A D, Parsons A J, Hirsch P J. Field and laboratory studies of resistance to interrill overland flow on semi-arid hillslopes, southern Arizona. In: Parsons AJ, Abrahams AD (eds). Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics. London: UCL Press, 1992, 1–23.
- [38] Hirsch P J. Hydraulic Resistance to Overland Flow on Semiarid Hillslopes: A Physical Simulation. PhD dissertation, State University of New York at Buffalo, 1996.
- [39] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov A, et al. Hydraulics

- and erosion in eroding rills. *Water Resource Research*, 1997, 33(4): 865–876.
- [40] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究. *人民黄河*, 1998, 20(8): 13–15.
- [41] Lawrence D S L. Macroscale surface roughness and frictional resistance in overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(4): 365–382.
- [42] Lawrence D S L. Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observations and modeling. *Water Resources Research*, 2000, 36(8): 2381–2393.
- [43] Hsieh T. Resistance of cylindrical piers in open-channel flow. *Proceeding of ASCE, Journal of Hydraulics Division*, 1964, 90: 161–173.
- [44] Flammer G H, Tullis J P, Mason E S. Free surface, velocity gradient flow past hemisphere. *Proceedings of ASCE, Journal of Hydraulics Division*, 1970, 96: 1485–1502.
- [45] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨. *中国水土保持科学*, 2003, 1(4): 16–19.
- [46] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 坡面径流的水动力学特性研究进展. *水土保持报*, 2002, 16(1): 76–80.
- [47] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11: 653–657.
- [48] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow. *Soil Technology*, 1992, 5: 289–301.
- [49] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: Shear stress relationships. *Transaction Of the ASAE*, 1984, 27(3): 797–804.
- [50] Rice, et al. Image processing system for measuring surface velocities. *Applied Engineering in Agriculture*, 1988, 4: 332–337.
- [51] Jau–You Lu, et al. Characteristics of shallow rain-impacted flow over smooth bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 9: 1242–1252.
- [52] 李雯. 坡面径流侵蚀过程试验研究: [硕士研究生学位论文]. 陕西西安: 西安理工大学, 2006.
- [53] 夏卫生, 雷廷武, 赵军, 等. 示踪法测定水流流速的研究. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 84–86.
- [54] 胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展. *地理研究*, 1998, 17(3): 326–335.
- [55] Emmett W W. The hydraulics of overland flow on hillslopes. *U S Geological Professional Paper*, 1970, 662–A, A–1–A–68.
- [56] Phelps H O. Shallow laminar flows over rough granular surfaces. *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1975, 101, 367–384.
- [57] King K W, Norton L. Methods of rill flow velocity dynamics. In: *American Society of Agricultural Engineering Meeting Presentation Paper*, 1992, 92–2542.
- [58] Gang Li, Abrahams A D. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Process and Landforms*, 1996, 21: 509–515.
- [59] Li G, Abrahams A D. Effect of saltating sediment load on the determination of the mean velocity of overland flow. *Water Resources Research*, 1997, 33: 341–347.
- [60] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 泥沙含量对盐液示踪法经验系数影响的研究. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 97–100.
- [61] 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.
- [62] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. *Earth Surface Processes Landforms*, 1992, 17(5): 515–528.
- [63] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(8): 677–686.
- [64] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1378–1387.
- [65] 姚文艺. 坡面流流速计算的研究. *中国水土保持*, 1993, 3: 21–25.
- [66] Gilbert G K. The transportation of debris by running water. *Geological Survey Professional Paper*, 1914, 86: 229–230.
- [67] Francis J R D. Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water-stream. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1973, 332: 443–471.
- [68] Luque R F, van Beek R. Erosion and transport of bed-load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 1976, 14 (2): 127–144.
- [69] Aziz N W, Scott D E. Experiments on sediment transport in shallow flows in high gradient channel. *Hydrological Sciences Journal*, 1989, 34: 465–478.
- [70] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow. *Water Resources Research*, 1993, 29: 3021–3028.
- [71] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem for general physics. In: *Geological Survey Professional Paper (U.S.)*, 1966. 442–.
- [72] 周佩华, 豆葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量的试验研究初报. *水土保持通报*, 1981, 1: 50–61.
- [73] Lal R. 土壤侵蚀研究方法. 黄河水利委员会宣传出版中心译. 北京: 科学出版社, 1991. 125–152.
- [74] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东, 等. 水土流失系统物质与能量交换途径的研讨. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 61–68.
- [75] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正. 黄土高原南部坡耕地土壤侵蚀预报. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 72–76.
- [76] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 39–43, 72.
- [77] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 13–17.
- [78] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 5–7, 49.

Progress in the Research of Hydrodynamic Characteristics of Sediment-laden Overland Flow

LUO Rongting¹, ZHANG Guanghui^{1,2}, CAO Ying¹

(1.School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Overland flow is the main cause for slope erosion, which has unique hydrodynamic characteristics. This paper made a systematic and thorough discussion on the flow pattern, frictional resistance, mean flow velocity measurement and runoff energy of sediment-laden overland flow, sediment concentration as well as the impacts of the above. Reynolds number (Re) and Froude number (Fr) are used to express flow pattern. The branch point of Re exists in the definition of “laminar flow”, and raindrop splash is the main reason for its specificity. Fr of overland flow free of sediment on bare soil is generally considered to be >1 . Different flow pattern results are also obtained in the meager literature of sediment-laden flow. However, most scholars believed that sediment-laden flow belonged to tranquil flow. There are different values of Darcy-Weisbach Friction Coefficient (f) in different experiments on hillslopes, and the factors that affect f are Re , water depth, Fr and sediment concentration. On the study of sediment-laden flow, f is closely related to Re , but the tendencies are quite different. In addition, f is inversely proportional to Fr , and on the contrary, it is directly proportional to sediment concentration. Many measurements of surface flow velocity have their respective advantages and disadvantages. Exact instrument is characterized by high price, required routine maintenance and harsh work conditions, which is usually used to measure overland flow free of sediment. So, exact instrument is not suitable for sediment-laden flow temporarily. The accuracy of flow measurement with tracers is not high, but the process of tracers diffusing would be slower through the effect of sediment concentration. As a result, using tracers to measure the velocity of sediment-laden flow is still applicable. Formulas for velocity of overland flow are usually simulated by a power function of discharge and slope gradient, and there are a negative relationship existing between flow velocity and sediment concentration. Runoff energy is synthesis of hydrodynamic characteristics of sediment-laden flow on hillslopes. Most scholars use different formulas of water potential energy to express runoff energy. Generally speaking, the runoff energy consumption of shallow flow on slope increases as sediment concentration increasing. On the basis of reviewing recent research at home and abroad, deficiencies from experimental device and skill and experimental content are also discussed. The main problems of experimental device and skill include low-precision of velocimeter and poor comparability of data. Besides, results of every hydrodynamic parameter acquired by experiment are almost about its average values of the whole hillslopes, and most experiment has been done under the condition of overland flow free of sediment on gentle slope. Finally, the corresponding suggestions are put forward to provide a theoretical basis for slope erosion mechanism and slope erosion model perfection.

Key words: overland flow; flow pattern; frictional resistance; flow velocity; runoff energy; sediment concentration