

土壤侵蚀过程中坡面流水力学特性及侵蚀动力研究评述^①

张永东¹, 吴淑芳^{1,2*}, 冯 浩^{1,2}, 原立峰³

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

3 南京邮电大学地理与生物信息学院, 南京 210003)

摘 要: 土壤侵蚀动力过程是水流和土壤两者相互作用的复杂物理过程, 而含沙水流是土壤侵蚀的主要动力, 深入理解坡面流水力学特征及侵蚀动力是研究土壤侵蚀动力学规律的基础。本文从坡面流水力学特性及侵蚀动力, 包括: 流速、水深、流态、阻力规律以及坡面流的切应力、冲刷动力、运动能量等多方面对国内外关于土壤侵蚀动力过程研究进行了系统深入的评述, 并探讨了研究中存在的问题, 重点指出: 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, 坡面状况较为复杂, 其均匀流理论远不能真实反应自然界复杂地表状况下的水流水力学特性及其变化规律。开展复杂地表的水流运动过程、水力学参数变化规律及坡面侵蚀水动力过程研究是今后土壤侵蚀水动力学研究的重要方向, 这对于深入了解土壤侵蚀水动力过程的内在机制、构建物理侵蚀模型具有重要的研究意义。

关键词: 坡面流; 土壤侵蚀; 水力学特性; 侵蚀动力

中图分类号: S157.1

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的重要环境问题之一, 在黄土高原地区尤为如此, 它已成为该地区社会经济发展的主要制约因素。土壤侵蚀动力过程是水流和土壤两者相互作用的复杂物理过程, 而含沙水流是土壤侵蚀的主要动力, 深入理解坡面流动力学特征及侵蚀动力是研究土壤侵蚀动力学规律的基础。然而, 坡面水流不同于一般明渠流, 其水深极浅, 水流运动受降雨及地表状况影响较大, 如降水强度和历时、土壤质地或种类、前期水分条件、植被密度和类型、坡度和坡长, 以及边界粗糙度和微地形, 所有这些指标的变化都将对水流运动产生显著影响, 使其坡面流运动特征发生显著变化。

近几十年来, 随着人们对自然环境研究的重视, 坡面流水动力学研究得到了较大的发展, 逐步由经验性分析走向动力学特征为主的机理研究。对坡面流的研究中, 国外学者 Horton^[1]、Nearing^[2]、Gilley^[3]及 Abraham 等^[4]已从早期对土壤入渗和表面滞留、片流层流特征、斜坡坡面流水深和流速预报研究发展到对坡面流细沟侵蚀的水力学要素、土壤颗粒分离、泥沙输移、冲刷能量等坡面流机理研究。国内学者张光辉^[5]、姚文艺^[6]、吴普特^[7]、吴淑芳等^[8]在变坡放水槽及野外坡地条件下, 研究了坡面流水动力学参数随

流量和坡度的变化规律、坡面流水力学特征、变坡径流流态的划分与归属、坡面流发生的临界水动力条件、坡面侵蚀水动力过程等等, 并取得了很多成果。本研究主要从坡面流水动力学特性及坡面侵蚀动力方面出发, 对国内外坡面流研究的最新进展、存在的问题及有待突破的研究重点进行了综合分析, 以期对今后的坡面流研究发展方向有所启发。

1 坡面流水动力学特性的研究概述

坡面侵蚀的发生取决于坡面水流的水力学特性和地表土壤条件。当坡面水流超过一定的水力学指标(称之水力临界)后, 才能发生细沟侵蚀。水力临界主要用径流流速、水深、流量、佛罗德数、雷诺数、流态、阻力系数、径流剪切力等来描述。

1.1 流速

坡面流流速直接影响坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程, 它是研究坡面土壤侵蚀的一个非常重要的水动力学参数, 同时它也是计算其他水动力学参数的必要参数。对坡面土壤侵蚀过程中的坡面流速进行研究, 有助于准确地认识坡面侵蚀演化过程及其发育发展机理, 因此历来受到国内外学者的重视。现阶段对坡面流速的研究一般集中在坡面流流速的测

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101255; 40801015)和教育部高校博士点专项基金项目(20100204120017)资助。

* 通讯作者(wsfsj@163.com)

作者简介: 张永东(1987—), 男, 重庆梁平人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀动力研究。E-mail: zhangyongdong1987@126.com

定方法和流速公式上。

1.1.1 流速测定方法 在坡面流流速测定方面, 颜料示踪法^[9]是长期以来较为常用的量测方法, 大多数学者认为该方法测得的是最大表层流速, 因此要对其修正以获得坡面的平均流速。然而此种方法存在较大的缺陷, 它无法克服人工计时及目视观测所带来的误差。随后 Luk 和 Merz^[10]对颜料示踪法进行了改进, 提出了盐液示踪法, 在一定程度上减小了人工计时及目视观测所带来的误差, 但它仅适用于较为集中的水流及细沟水流的观测, 而不适用于水深较浅的坡面径流的流速测定。夏卫生等^[11]又在示踪法的基础上, 建立盐液在水流中迁移的数学模型, 进一步提出了一种较新的测速方法——电解质脉冲法, 通过与前两种方法进行对比试验, 研究表明该方法从理论上看是合理的, 其可行性还需要用大量的实验进行验证。Lei 等^[12]和史晓楠等^[13]对电解质示踪脉冲模型的边界条件进行改进, 采用正态分布函数代替脉冲函数的边界, 提出了电解质示踪法测量流速的正态模型, 与脉冲模型比较, 正态模型不同程度地降低了不同测量位置流速预测的误差。随着坡面流流速的广泛研究以及科学技术的发展, 一些较为先进、可靠的测定方法也逐步出现, 其中主要以光学为基础(如摄影或激光等)并结合自动化技术的测量方法为代表, 如影像分析系统、二元光纤激光 Doppler 流速仪等, 但这些测量仪器由于比较精密, 价格昂贵, 维护费用较高, 并且使用条件苛刻, 多用于测量清水的流速, 因此其对

于高含沙水流流速测定时的可行性和精确性仍值得进一步去研究。

1.1.2 流速公式 现阶段, 坡面流流速的计算公式大多是参照明渠均匀流理论进行计算与分析, 一般是通过建立流速与流量、坡度之间的关系式来获取坡面流流速, 认为坡面流流速与流量、坡度之间呈良好的正相关关系。在国外, 1984 年 Foster 等^[14]研究了细沟侵蚀条件下水流流速的分布特征, 结果表明细沟内水流流速主要受流量和坡度的影响且坡度是主要影响因素。近年来, Nearing 等^[15]通过侵蚀细沟实验, 研究发现水流速度仅是流量的简单函数, 而与坡度无关, 他认为这与侵蚀细沟的阻力组成有关。除此之外, 含沙量也与坡面水流流速存在一定的关系, 大多数学者认为坡面流流速随含沙量的增加而减小, Abrahams^[4]在野外模拟细沟的条件下, 得出在相同流量条件下, 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。国内学者也对坡面流流速公式进行了大量研究, 江忠善和宋文经^[16]在综合分析国内外坡面水流流速资料的基础上, 充分考虑到坡面流的流动特性, 将坡面流流速概化为统一的形式: $V = Kq^n S^m$, 其中, K 、 n 、 m 为参数; 随后又将该公式与自己的试验结果相结合, 拟合出了各参数的数值。近年来, 众多学者也对坡面流流速进行了试验测定和分析, 确定了各参数的数值, 得出了各自的坡面流流速公式^[17-22]。表 1 总结了近年来国内外关于坡面流流速公式研究中比较有代表性的工作。

表 1 坡面流流速计算公式
Table 1 Formula for velocity of overland flow

研究者	径流类型	实验方案	流速公式	参数意义
Foster ^[23]	细沟流	模拟细沟径流冲刷试验	$V = 16.0Q^{0.28}S^{0.48}$	Q 为流量
江中善 ^[24]	坡面流	收集国内外坡面流流速资料结合野外试验	$V = 2.09q^{0.5}S^{0.35}$	同上
姚文艺 ^[17]	坡面流	室内人工模拟降雨试验	$V = \frac{1}{f^{1/3}}[8gS(q + ix)]^{1/3}$	f 为阻力系数; i 为降雨强度; x 为沿水流方向距离
Abrahams ^[4]	细沟流	野外放水冲刷试验	$\lg V = 0.733 + 0.329 \lg Q - 0.00178\%G + 0.18 \lg S - 0.188 \lg M$	$\%G$ 为土壤中直径大于 2 mm 颗粒的百分数; M 为细沟糙率
张科利和唐克丽 ^[18]	细沟流	室内模拟细沟冲刷试验	$V = 5.544Q^{0.2636}S^{0.2511}$	同上
张光辉 ^[19]	细沟流	室内变坡水槽试验	$V = 23.66Q^{0.542}S^{0.246}$	同上
李鹏 ^[49]	坡面流	室内模拟冲刷试验	$V = 0.096Q^{0.13}S^{0.37}$	同上
李君兰 ^[22]	坡面流	室内人工模拟降雨试验	$V = 0.119 + 0.016x + 0.038I$	同上
苏涛 ^[21]	坡面流	野外实地放水冲刷试验	$V = 0.0022q^{0.7982}$	q 为冲刷流量

纵观以上有关坡面流速研究, 笔者发现, 前人得出的坡面流流速公式一般都是在把坡面流视为一维恒定非均匀沿程变量流的前提下, 借助于明渠均匀流理论而推求出的整个坡面的平均流速, 只能反映整个

坡面土壤侵蚀的规律和反映整个坡面平均的径流侵蚀动力, 当坡面条件变为相当复杂时, 更难准确反映整个坡面流速, 进而没有真正揭示整个坡面流速的时空变异规律和因此而导致的侵蚀结果。因此, 坡面流

作为三维、非均匀非恒定的沿程变量流,需要通过提高设备的精度,积极开展复杂坡面不同断面流速测量和计算方法的研究,开展有关坡面流流速的时空分布规律研究。

1.2 平均水深

坡面薄层水流的平均水深,与平均流速一样,它也是研究坡面流最重要的水动力学参数之一。然而坡面流作为三维、非均匀非恒定的沿程变量流,其水深很浅,同时易受下垫面状况、植被覆盖、降雨及其扰动影响,因此很难对复杂坡面的水深进行准确的测量,所以现在大多数研究都将坡面水流视为简单的恒定流,采用水位测针法对水深进行测定,因此目前由于实验条件及实验仪器的限制,无法对坡面流水深进行深入的研究。现阶段,大多学者一般都将坡面流化为一维的、恒定的、压强符合静水压强分布的非均匀流,再结合达西定律,对坡面单元水体进行分析得到水深的沿程分布公式,研究表明同坡面流流速相似,坡面流水深与流量和坡度之间也呈简单的幂函数关系,同时坡度对平均水深的影响与流量相比仍然很小^[19]。

1.3 水流流态

水流流态是坡面流最基本的水动力学特性之一,它对坡面流的径流计算和输沙演算有直接的影响。坡面流流态的研究一直是坡面流研究领域的热点问题之一。然而坡面流流态极为复杂,并且受多种因素的影响,因此目前关于坡面流究竟属于紊流还是层流仍有较多不同的意见,现阶段判别坡面水流流态主要也

是和明渠水流一样,一般都参照雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 进行。Horton^[25]通过实验观察认为,坡面流是一种混合状态的水流,即完全紊流区域上点缀着层流区;Emmett^[26]认为,与普通的层流、紊流及过渡流不同,坡面流由于降雨雨滴击溅,水流被充分扰动,紊动扩散强烈,这种水流状态虽然具有一些紊流性质,但同时也具有大部分层流的特征,因此称之为:扰动流(disturbed flow);陈国祥和姚文艺^[27]通过室内人工模拟降雨水槽试验,研究了降雨影响下浅层水流的流动规律,将降雨扰动下的坡面流定义为“伪层流”,即降雨雨滴打击地表土壤,引起局部水流扰动,但整体水流仍处于层流状态。吴普特和周佩华^[28]对黄土坡面薄层水流侵蚀进行了系统研究,认为坡面薄层水流仍属于层流范畴,并根据水流流动的特征,将其定义为搅动流(agitated laminar flow)。近年来,又有学者认为在一定临界水力条件下,坡面水流会以一种特殊的流动形式(滚波)沿坡向下运动,以至于出现大波追及小波,小波聚叠形成大波并以滚雪球形式向前传播,该水流现象在水力学中称为“滚波流”^[29]。高军侠等^[30]利用野外人工模拟降雨实验,对不同耕作方式下坡面流流态进行研究,结果表明径流在直线坡、锄耕地和顺坡耕作水平下,形成“扰动层流”,而等高垄作则具有明显的紊流特征。由此可见,在坡面流流态究竟属于哪种形态,国内外学者的看法并不是很一致,进一步加强这方面的研究就显得非常必要。本文对近年来国内外学者对坡面流流态的研究做了个简要的总结与分析,见表 2。

表 2 坡面流流态
Table 2 Water flow regime of overland flow

研究者	水流流态	特征
Horton ^[25]	混合状态的水流	完全紊流区点缀着层流区
Emmett ^[26]	扰动流	具有一些紊流性质,但同时也具有大部分层流的特征
江中善 ^[24] 和沙际德 ^[31]	过渡流	当坡度较缓时,薄层水流可能是缓流;当坡度较陡时,薄层水流处于急流状态
陈国祥和姚文艺 ^[27]	伪层流	雨滴打击引起局部水流掺混,但整体水流仍处于层流状态
吴普特和周佩华 ^[28]	搅动流	虽受到降雨及坡面糙率扰动仍属于层流范畴; 坡面薄层水流其流态为急流,即超临界流
张光辉 ^[19]	过渡流和紊流	坡面薄层水流很少以层流流态出现
李占斌 ^[29]	滚波流	水流出现大波追及小波,小波聚叠形成大波并以滚雪球形式向前传播
高军侠 ^[30]	不同耕作方式,流态不同	径流在直线坡、锄耕地和顺坡耕作水平下,形成“扰动层流”, 而等高垄作则具有明显的紊流特征

1.4 坡面流阻力规律

坡面薄层水流阻力规律是反映坡面流水动力学特性一个极为重要的参数,它是认识坡面流侵蚀过程及机理的基础,也是坡面流计算及土壤侵蚀模拟过程中不可或缺的参数。因此坡面流阻力规律是坡面流水

动力学特性研究的核心问题之一,然而它受坡面降雨及地表状况等因素的影响,形式非常复杂,因而很难从理论上对其进行描述。现阶段还是主要参照一般明渠水力学与河流水力学的阻力概念及表达方法来探求坡面薄层水流的阻力规律,即主要应用 Darcy-

Weisbach 公式、Chezy 公式和 Manning 公式来推求坡面流阻力。初期对坡面流阻力的研究主要是根据野外观测资料来确定,并通过回归分析将它们与影响阻力的因素,如雷诺数、雨强、土壤粒径等联系起来建立阻力公式。

20 世纪 70 年代以来学者们主要通过室内或野外模拟降雨、放水冲刷试验,在研究坡面流阻力方面积累了大量的经验。众多学者在不同坡面上对坡面流阻力规律进行了试验研究,Emmett^[26]、Abrahams 和 Parsons^[32]、Li^[33]、陈国祥和姚文艺^[27]、郑良勇等^[34]分别在不同条件下计算了特定条件下的阻力系数,但由于不同研究者的试验方案、测量方法的不同及土壤特性和地形条件的差异,因此所获得的坡面流阻力系数也不尽相同,在实际研究中缺乏可比性。

坡面薄层水流的阻力系数受多种因素的影响,研究阻力系数与各影响因子之间的关系,也是坡面阻力研究的重要内容,其中主要的研究包括阻力系数-雷诺数、阻力系数-淹没比(淹没比为平均水深与坡面平均糙率深度的比值)、阻力系数-弗汝德数、阻力系数-含沙量的关系,研究最多的是阻力系数与雷诺数之间的关系,即 $f-Re$ 的关系。大多数学者认为二者之间呈幂函数形式: $f=aRe^{-b}$ 。姚文艺^[6]针对过去研究坡度较小的缺陷,进行了一系列降雨情况下坡面流阻力实验,其坡度最大达到 20° ,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。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,而是同时包括了颗粒阻力、形态阻力、波阻力和降雨阻力。Gilley 和 Flanagan^[35]也类似运用阻力分割的方式将阻力系数分为细沟阻力、卵砾石物质阻力、地表植物残茬阻力和农耕地作物阻力等总阻力之和。Hu 和 Abrahams^[36]探讨坡面上泥沙运动对水流阻力的影响,并运用量纲分析推导了水流阻力与弗汝德数、相对深度、含沙浓度等因素之间关系。

目前关于坡面流阻力规律研究的试验分析方法主要有两种:宏观分析方法和微观分析法。所谓宏观分析法,即是在出口测定总径流量,然后将测量结果根据水力学方法与水流阻力联系起来,分析计算出坡面流的平均阻力参数。宏观分析法所要求的资料较容易获得,资料精度也容易保证,常适用于野外小区试验。但此方法所得结果仅是坡面流整体的平均状况,不能真实反映坡面流过程中的水动力特性。而微观分析法,它要求在试验过程中实时观测水流某些断面上的瞬时水力要素资料,如瞬时流速、水深等,而

后通过统计分析,推求得出关于坡面流阻力系数的关系。该方法能较好地反映坡面水流的流动过程,但其水力要素的测定和精度很难保证。因此,还必须探求从新的角度、新的方法对坡面流的阻力规律进行研究,为进一步澄清坡面流侵蚀动力机制提供科学依据。

现阶段坡面流水力学特性研究大多都是在单一坡面下进行的,并没有对不同下垫面条件下的水力要素进行深入分析,未能很好地反映坡面流变化过程。针对这一问题,也有少数学者对其进行了研究分析:潘成忠和上官周平^[37]在不同盖度的草被覆盖条件下,通过室内模拟降雨试验,研究了不同盖度草地的坡面流阻力变化,发现草地坡面的 Darcy-Weisbach 和 Manning 阻力系数随草地盖度的增大呈增加趋势,且其阻力系数均大于裸地坡面,而裸露坡面阻力系数则变化不大。肖培青和姚文艺^[38]通过人工降雨实验,研究发现当草地覆盖度在 40% 以上时,坡面流态呈层流缓流态,且不同覆盖度条件下草地的平均流速、水力半径、雷诺数和弗罗德数与覆盖度之间呈负相关关系,而阻力系数随覆盖度的减少呈减小的趋势,从而引起坡面侵蚀产沙量的增大。

2 坡面流侵蚀动力研究

2.1 薄层水流对土壤的分散和输移过程

由于坡面薄层水流的复杂性,使坡面薄层水流的输沙条件与明渠水流输沙条件有显著的不同,坡面薄层水流的输沙能力由径流作用和雨滴打击作用两部分构成。但是,往往雨滴击溅侵蚀在这个侵蚀过程中所占比例很小,因此薄层水流的冲刷侵蚀成为了主要的研究对象^[39]。

细沟水流冲刷作用是几种作用的综合,包括溯源冲刷、水流剪切力作用和因水流冲刷而引起的坍塌。基于这一概念, Meyer 等^[41]将细沟冲刷模型表示为:

$$E_w = A_s + A_m \quad (1)$$

式中: E_w 为细沟冲刷; A_s 为剪切冲刷; A_m 为溯源冲刷。

Elliot 和 Laflen^[41]更进一步把水流的分散能力分为水流冲刷、沟头冲刷、水流淘蚀和细沟剥落 4 部分。

同一土壤条件对片蚀和细沟侵蚀的影响是不同的。Forster^[42]突出了细沟土壤可蚀性(K_r)的概念,在修正的通用土壤流失方程(RUSLE)、水蚀预报模型(WEEP)中都将细沟间土壤侵蚀可蚀性与细沟土壤可蚀性加以区别。

为了便于应用,近年来仍进行了径流分散搬运能

力的统计模型的研究。吴普特^[7]根据试验资料,建立了计算薄层水流侵蚀量的经验公式,即

$$E = 932.622\alpha^{0.0092}H^{0.11}L^{0.097} \quad (2)$$

式中: E 为侵蚀量(kg); α 为地面坡度($^{\circ}$); H 为水深(mm); L 为坡长(m)。

Zhang 等^[43]在对侵蚀影响因子综合分析的基础上,建立了计算细沟侵蚀量的关系式:

$$D_i = K_i q^{1/2} S^{2/3} \quad (3)$$

式中: D_i 为单位面积时间内薄层水流的搬运能力; K_i 为土壤可蚀性; S 为坡度; q 为单位时间单位面积的输沙率。

Meyer 等^[40]认为,存在着发生细沟侵蚀的临界流量,并以细沟内流量(Q_r)与细沟发生的临界流量(Q_c)的差值作为变量,建立了计算细沟侵蚀冲刷量模型,即

$$E_r = K_r(Q_r - Q_c) \quad (4)$$

郑粉莉^[44]通过试验分析得出发生细沟侵蚀的临界流量与降雨特征和地面坡度等有关。试验观测资料表明,细沟发生的临界流量随着坡度和降雨能量的增加而减少。

张光辉^[5]在分析国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展中指出:坡面侵蚀过程包括降雨击溅和径流冲刷引起土壤分离、泥沙输移和沉积 3 大过程,研究和分析这些过程发生、发展的水力、土壤、地形条件以及各过程间相互转化、相互影响的机理,是建立土壤侵蚀物理模型的前提条件。

2.2 薄层水流的冲刷动力

许多学者对薄层水流的侵蚀力进行了研究。Horton^[25]从摩擦阻力概念出发,应用水流连续方程和曼宁公式推导出坡面上任一距离 x 处的径流侵蚀力公式:

$$F = \frac{W_1}{1000} \left(\frac{q_s n x}{36} \right)^{3/5} \frac{\sin \alpha}{\tan^{0.3} \alpha} \quad (5)$$

式中: W_1 为每立方米含沙水流的重量; α 为地面坡度; q_s 为径流强度; n 为曼宁糙率系数。

许多研究者认为坡面水流侵蚀力与水流切应力成正比,径流引起的土壤的分散率是径流切应力与土壤颗粒分散的临界切应力差值的函数^[45]。Forster 和 Meyer^[46]及 Nearing 等^[2]认为只有当径流中的含水量小于径流输沙能力且坡面径流侵蚀力 τ_f 大于土壤颗粒分散临界切应力 τ_c 时,径流才会对土壤分散侵蚀,并给出了计算径流分散能力的关系式,即:

$$D_c = K(\tau_f - \tau_c) \quad (6)$$

Forster 等^[47]又在原有理论上提出了用下列

公式计算水流的剪切力:

$$\tau_c = C_r \gamma \left(\frac{f_c}{8g} \right)^{1/3} S^{2/3} q^{2/3} \quad (7)$$

式中: τ_c 为水流剪切应力; γ 为水的容重; g 为重量加速度; f_c 为摩擦系数; S 为地面坡度; C_r 为有效剪切力与平均剪切力的比值; q 为单宽流量。

考虑到土壤的可蚀性和存在临界剪切力,Forster^[42]提出的细沟冲刷模型为:

$$E_r = K_r(\tau_r - \tau_{cr})C_r \quad (8)$$

式中: E_r 为单位面积土壤流失量; τ_r 为水流作用土壤表面的有效切应力; τ_{cr} 为临界切应力; K_r 为细沟土壤可蚀性系数; C_r 为土壤管理因子。

Nearing 等^[2]认为细沟水流的冲刷力可用水流的切应力大于土壤临界切应力以及输沙能力大于实际输沙量的概念来确定,提出如下模型,此模型即为美国新一代水蚀预报模型(WEEP)的物理基础。

$$D_f = D_c [1 - G/T_c] \quad (9)$$

式中: D_f 为细沟冲刷率; D_c 为水流分散能力; T_c 为水流输沙能力; G 为实际输沙量。

国内学者吴普特^[48]从径流冲刷动力角度出发,分析了径流冲刷及侵蚀产沙作用实质,提出了表征径流冲刷动力的因子——次降雨径流深 H (mm),并对该因子的变化特征进行了分析,据此提出了表征径流冲刷与土壤抗冲作用效果的土壤抗冲性动态指标 K_w ,以及衡量土壤抵抗径流冲刷能力强弱的土壤抗冲性动态指标均值 K_w ,并对 K_w 的影响因子进行了初步研究。李鹏等^[49]研究发现:径流输沙率随径流流量的增加而增加,随坡度呈抛物线形式变化,当坡度在 $21^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 之间时输沙率最大;径流剪切力也具有类似变化。泥沙输移率与径流剪切力之间存在线性关系,径流临界剪切力为 $1.701 \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,发生细沟侵蚀的临界径流水深与坡度正弦值呈反比例关系。

2.3 薄层水流的运动能量

从物理学角度看,土壤侵蚀实际上是一种做功消耗能量的过程,通过这种能量消耗造成土壤团粒分散,从而引起地表径流紊动、冲刷、输移土壤颗粒等过程的产生,最终促进坡面侵蚀的产生和发展,侵蚀过程逐渐由渐变的增进过程转变为突变的飞跃过程。1966 年 Bagnold^[50]提出了水流功率的概念,即单位面积水体势能随时间的变化率。随后基于对坡面径流做功消耗能量过程的理解, Yang^[51]提出了单位水流功率的概念,将其定义为流速和坡降的乘积,但单位径流功率公式最初仅适用于明渠流。李鹏等^[49]在此基

础上对坡面和细沟侵蚀率进行了计算,发现 Yang 的方法能够较好地预测坡面流和细沟流的输沙率。

与国外相比,国内这方面的研究起步较晚,且均以国外理论为基础。张科利和钟德钰^[52]对坡面径流的侵蚀过程进行了模拟试验,并从径流能耗的角度对其进行了深入的研究,发现可将坡面土壤侵蚀表示为径流能耗的函数,坡面土壤侵蚀的发生具有一定的临界能量条件。谭贞学等^[53]通过室内人工降雨实验,对细沟侵蚀进行了分析研究,发现降雨径流过程中,细沟输沙率对水流切应力的响应关系呈幂函数方程关系,而与水流断面单位能量和单位水流功率的相关性较差。王军光等^[54]研究了第四纪黏土发育红壤分离速率,研究结果表明红壤分离速率是流量、坡度的幂函数;水流剪切力、水流功率和单位水流功率 3 个水动力参数指标与土壤分离率均呈线性关系。丁文峰^[55]利用放水冲刷试验对红壤和紫色土坡面径流进行了研究,总结出径流剪切力、单位水流功率、过水断面单位能量及水流功率 4 个参数与分离速度均存在着明显的线性关系,但相对而言,水流功率更能准确反应坡面分离速度的变化情况。肖培青等^[56]对植被影响下坡面侵蚀临界水流能量进行了实验研究,得出试验条件下苜蓿草地的临界径流剪切力值为 2.857 N/m^2 ,临界单位水流功率值为 0.0114 m/s ,输沙率随径流剪切力和单位水流功率的增大而增大。

许五弟等人^[57]曾根据力学和物质与能量原理,对土壤水力侵蚀这一自然地理现象从哲学的高度进行分析,认为水动力作用是土壤水力侵蚀的根本原因;物质与能量守恒是土壤水力侵蚀的基本法则;侵蚀与沉积并存是土壤水力侵蚀的普遍规律。提出基于能量力学机理的侵蚀平衡理论、最大梯度理论和水流侵蚀力理论等 3 个土壤水力侵蚀的新理论。并指出按这种思想建立的数学模型能揭示土壤水力侵蚀的规律,具有重要的理论和应用价值。

崔文滨^[58]的研究表明:当坡度为 $3^\circ \sim 27^\circ$ 时,单位径流的侵蚀功率随坡度的增加而增大;当坡度增加到 27° 时,单位径流功率达到最大值,而后随着坡度的继续增加,单位径流功率有所减少。实测数据和据单位径流侵蚀功率理论计算的坡面单宽径流侵蚀产沙量表现出了相似的变化规律,两者都随坡度的增加呈抛物线变化,坡面单宽径流侵蚀产沙量的最大值都出现在 21° 左右,且二者之间具有良好的线性关系。说明径流功率理论可以较好地应用于坡面单宽径流侵蚀产沙量的计算。李鹏^[49]等人分别利用坡面径流剪切力、坡面径流能耗和坡面径流单位水流功率

理论对坡面土壤侵蚀发生过程进行了研究。发现坡面径流平均输沙率与坡面径流平均剪切力之间、径流单宽输沙率和单宽径流能耗之间、坡面径流功率与径流平均输沙率之间均存在比较明显的线性关系,3 种理论在土壤侵蚀研究中的应用各有优势,但坡面径流能耗理论相对简便并且误差较小,更利于对坡面土壤侵蚀过程进行描述。

总之,运用水流切应力、水流功率或单位水流功率、径流动能法线性函数等揭示坡面流侵蚀力所引起的土壤分离过程是行之有效方法。然而,当坡面条件因坡度、植被、地形、地表覆盖条件综合影响下变得更为复杂时,3 种描述坡面流水动力侵蚀过程理论是否仍能全面揭示坡面水流冲刷的真正机理,这将成为今后重要的研究方向。

3 结语

纵观上述有关土壤侵蚀过程中水流水力学特性及侵蚀动力研究现状,笔者发现:前人的研究大多依赖室内小土槽或室外小面积的土壤质地均一、地表平整的裸坡,在试验设备较落后的条件下开展的坡面流体力学特性的模拟实验。且大多将坡面流参照明渠均匀流理论进行参数计算与分析,反映的是整个坡面流的平均情况。实质上,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,尤其是对于坡面状况较为复杂时,其均匀流理论远不能真实反映自然界复杂地表状况下的水流水力学特性及其变化规律。因此,针对坡面流水力学诸多参数在复杂坡面侵蚀过程中的分布规律以及水流运动特性研究较少的状况,今后需要开展以下几方面的研究内容:

(1) 在试验设备、量测技术方面,常用的染色剂测量流速的方法仍存在许多缺点,不能精确测量流速、水深仍是制约坡面流水动力学特性研究的重要因素,因此,开发一种能准确测量坡面流流速、水深的仪器是研究非常重要的环节。建议探索采用三维激光扫描仪对地表进行全方位立体扫描,采用 Microsoft Kinect 激光快速摄影和示踪法监测技术实时准确获得坡面流速,通过室内实验与计算机模拟,采用 Cyclone 软件和 Arcview 软件对地表形态不同演化阶段进行图象化,准确获得坡面流水力要素。

(2) 在坡面流水力要素的变化规律研究方面,坡面流作为三维、非恒定非均匀沿程变量流,其流动形态千变万化,而目前大多研究所获得的关于水动力学特性的结论都是整个坡面的平均状况,对这些参数在复杂坡面以及复杂坡面的侵蚀演化过程中的分布规

律及其水流运动特性研究还处于空白,这是今后需要研究的重要内容。

(3) 在坡面流阻力规律研究方面,目前大多仍使用 Darcy-Weisbach 阻力系数公式,然而该公式反映的是坡面处于均匀流条件计算而得。对于刚刚起步的阻力规律尽管已有人将阻力详细划分为颗粒阻力、形态阻力、波阻力和降雨阻力,然而,将其应用在坡面条件复杂的地形上,明确阻力来源、相应阻力内涵及计算式和主要存在形式,以及阻力规律与侵蚀产沙之间的关系等内容也是今后坡面流侵蚀过程研究的重要方向。

(4) 在坡面流冲刷动力方面,前人主要在平整裸坡条件下单方面运用了水流剪切动力、水流冲刷能量进行土壤分离过程研究。然而,当坡面条件因坡度、植被、地形、地表覆盖条件综合影响下变得更为复杂时,运用水流切应力、水流功率或单位水流功率、径流动能法线性函数 3 种方法相互对比,开展坡面流侵蚀力所引起的土壤分离过程机制研究,确定各方法的适应性和局限性等内容也是今后重要的研究方向。

参考文献:

- [1] Horton RE, Leach HR, Van VR. Laminar sheet flow[J]. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393-404
- [2] Nearing MA, Forster GR, Lane LJ. A process-based soil erosion model for SDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1 587-1 593
- [3] Gilley JE. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(6): 1 900-1 906
- [4] Abraham AD. Rill hydraulics on a semi-arid hill slope southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 35-47
- [5] 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
- [6] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(1): 74-82
- [7] 吴普特. 动力水蚀试验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 47-59
- [8] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀. 坡面土壤分离过程水动力学机制研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 223-228
- [9] Abrahams AD, Parson AJ, Luk SH. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11: 653-657
- [10] Luk SH, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5: 289-301
- [11] 夏卫生, 张宏, 刘贤赵. 电解质脉冲法测量降雨条件下坡地水流速度的实验研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(6): 26-28
- [12] Lei T, Xia W, Zhao J. Method for measuring velocity of shallow water flow for soil erosion with an electrolyte tracer[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1/4): 139-145
- [13] 史晓楠, 雷廷武, 夏卫生. 电解质示踪测量坡面薄层水流流速的改进方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 65-70
- [14] Foster GR, Huggins L, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics. I: Velocity relationships[J]. Transaction of ASAE, 1984, 27(3): 790-796
- [15] Nearing M, Simanton R, Norton D. Soil erosion by surface water flow on a stony semiarid hill slope[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 677-686
- [16] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 中国科学院西北水土保持所集刊, 1988(7): 46-52
- [17] 姚文艺. 坡面流流速计算的研究[J]. 中国水土保持, 1993, 3: 21-25.
- [18] 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
- [19] 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.
- [20] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444-449
- [21] 苏涛, 张兴昌, 赵怀玉. 砒砂岩地区坡面径流水动力学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 203-209
- [22] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78
- [23] Foster GR, Huggins LF, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics: velocity relationships[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 3: 790-796.
- [24] 江中善, 李秀英. 黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 40-50.
- [25] Horton RE. Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological society of America bulletin, 1945, 56: 275-370.
- [26] Emmett W. Overland flow // Kirkby MJ. Hillslope Hydrology[C]. New York: John Wiley and Sons, 1978: 145-176
- [27] 陈国祥, 姚文艺. 降雨对浅层水流阻力的影响[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 42-46
- [28] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 1(2): 14-19
- [29] 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[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5-7, 49
- [30] 高军侠, 刘作新, 党宏斌. 黄土高原坡面模拟降雨超渗径流特征分析[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 780-784
- [31] 沙际德, 蒋允静. 试论初生侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 29-35
- [32] Abrahams AD, Parsons AJ. Hydraulics of interrill over-land flow on stone-covered desert surfaces[J]. Catena, 1994, 23: 111-140
- [33] Li G. Preliminary study of the interference of surface objects and rainfall in overland flow resistance[J]. Catena, 2009, 78: 154-158
- [34] 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[J]. 水利学报, 2004, 5: 46-51
- [35] Gilley JE, Flanagan DC. Darcy-Weisbach roughness coefficients for overland flow // Abrahams AD, Parson AJ.

- Overland Flow-Hydraulics and Erosion Mechanics[C]. London: UCL Press, 1992: 25–52
- [36] Hu Shixiong, Abrahams AD. Partitioning the flow resistance to overland flow on rough mobile beds[J]. *Earth Surface Processes and Landform*, 2006, 31(10): 1 280–1 291
- [37] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 1–8
- [38] 肖培青, 姚文艺. 草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 50–53
- [39] 陈国祥, 姚文艺. 坡面流体力学[J]. *河海科技进展*, 1992, 12(6): 7–13
- [40] Meyer LD, Forster GR, Romkens MJ. Source of soil eroded by water from upland slopes // *Present and Prospective Technology for Prediction Sediment Yield and Sources*[C]. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1975: 177–189
- [41] Elliot WJ, Laflen JM. A process-based rill erosion model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36: 65–72
- [42] Forster GR. Modeling the erosion process // Haan CT, Johnson HP, Brakensiek DL. *Hydrologic Modeling of Small Watershed*[C]. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982: 297–360
- [43] Zhang XC, Nearing MK, Miller WP. Modeling interrill sediment delivery[J]. *The Soil Science of America Journal*, 1998, 62: 438–444
- [44] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 95–101
- [45] Wischmeier WH. Rainfall erosion potential. *Agricultural Engineering*, 1962, 43(4): 212–215
- [46] Forster GR, Meyer LDA. A closed-form soil erosion equation for upland areas // Shen HW. *Symposium of Sedimentation*[C]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1972: 1–7
- [47] Forster GR, Meyer LDA, Onstad CA. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. *Transactions of the ASAE*, 1977, 20(4): 678–682
- [48] 吴普特. 黄土坡地径流冲刷与土壤抗冲动态响应过程研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 92–93
- [49] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 42–45
- [50] Bagnold RA. An approach to the sediment transport problem from general physics // William TP. *Geological Survey Professional Paper (U.S.)* [C]. Washington: United States Government Printing Office, 1966: 11–142
- [51] Yang ZT. Incipient motion and sediment transport[J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 99(10): 9 198–9 341
- [52] 张科利, 钟德钰. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[J]. *泥沙研究*, 1998, 3: 74–80
- [53] 谭贞学, 王占礼, 刘俊娥. 黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 9(5): 1–6
- [54] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法. 坡面冲刷过程中红壤分离速率定量研究. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(1): 96–100
- [55] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 16–22
- [56] 肖培青, 姚文艺, 申震洲. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(2): 232–237
- [57] 许五弟, 袁勘省, 杨瑾. 土壤水力侵蚀能量力学机理的理论分析. [J] *西北大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(2): 175–178
- [58] 崔文滨, 李鹏, 李占斌. 径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(9): 103–107

Review on Hydraulic Characteristics and Erosion Dynamics of Overland Flow in Soil Erosion Process

ZHANG Yong-dong¹, WU Shu-fang^{1,2*}, FENG Hao^{1,2}, YUAN Li-feng³

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 College of Geography & Biological Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210008, China)

Abstract: Soil erosion dynamic process is a complicated physical process in the interaction between water and soil, and sediment laden flow is the main dynamic of soil erosion, therefore, a better understanding of hydraulic characteristics and erosion dynamics on overland flow is the basis to research dynamics law of soil erosion. This paper discussed systematically and thoroughly hydraulic characteristics and erosion dynamics of overland flow including the aspects of velocity, water depth, water flow regime, resistance law, shear stress, scouring dynamics, kinetic energy research and the existing problems of research, furthermore, it also emphasized that water flow regime and slope status are so complicated as overland flow is a three dimensional, unsteady and non-uniform spatially varied flow that uniform flow theory could not reveal hydraulic characteristics and their change law of complex surface conditions in nature. Therefore, water movement, change law of hydraulic parameters and soil erosion processes on overland flow are important directions for research on hydrodynamics of soil erosion which is significant for further understanding internal mechanism of soil erosion hydrodynamic processes and construction of physical erosion model.

Key words: Overland flow, Soil erosion, Hydraulic characteristics, Erosion dynamics