

坡面水蚀过程的力能体系及研究思路

赵晓光 吴发启

(西北农林科技大学 陕西杨陵 712100)

摘 要: 通过对作用于水蚀过程中力能变化的分析, 重点描述了雨滴击溅力、坡面径流力、土粒黏结力、地表摩擦力的计算方法及作用过程和主要影响因子, 对于表达式中各参数, 设计出确定其数值的实验方案。

关键词: 水力侵蚀 坡面力学体系 径流

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2000)01-0023-04

Research Frame for Force and Energy System in Water Erosion Process in Slopes of Gully

ZHAO Xiao-guang WU Fa-qi

(Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry Yangling Shaanxi 712100)

Abstract On the basis of analysis for force and energy in water erosion processes, some calculative methods force and energy produced by raindrop splash, runoff, adhesion of soil particles, friction from soil surface, and some major factors affected them were described. The experimental schemes for parameters in some formulae were put forward.

Key words water erosion force and energy system in slopes of gully runoff

坡面水蚀过程的研究始终是侵蚀研究中的重点之一, 众多的研究从各个不同角度揭示了部分特征或规律, 但系统的描述其整个作用过程的论述还没有见到, 研究多是侵蚀或输移的结果, 对侵蚀力的作用过程也不是很清晰; 有时力的作用原理描述不清, 容易把几种力的共同作用混为一谈, 导致过程的复杂化, 增加研究难度。

侵蚀过程是侵蚀动力与侵蚀阻力在坡面上土颗粒或其集合体间相互消长的过程, 这个过程作用的结果导致土壤发生分散、输移、沉积, 因此建立水蚀过程中的力能体系, 用力(动力、阻力)在作用过程中的量值变化或能量增减反映坡面土壤侵蚀——输移过程, 是研究解决问题的途径之一。

1 侵蚀动力计算

1.1 雨滴击溅力

(1) 首先从单雨滴入手, 其雨滴动能

$$E = \frac{1}{2} m \mu^2$$

$$m = V \cdot \rho \quad V = \frac{1}{6} \pi d^3$$

用量杯量测 100 个或更多相同雨滴的体积或用滤纸法来量测雨滴直径 d , 即可求得 m , 终点速度 μ 通过测量雨滴下落高度 S 和历时 t 可求得。

(2) 对场降雨而言, 若雨滴大小一致, 则终点速度 μ 大小相同, 总能量

$$E = n \cdot \frac{1}{2} m \mu^2$$

$$= n \cdot \frac{1}{2} V \cdot \rho \cdot \mu^2$$

$n \cdot V$ 为所有雨滴的总体积, 即场降雨量 P 与降雨面积 A 的乘积

则
$$n = \frac{6V}{\pi d^3}$$

* 收稿日期: 2000-01-01

国家“九五”重点科技攻关计划项目, 编号为 96-004-05-07。

$$= \frac{6P \cdot A}{\pi d^3}$$

测得雨滴直径,即可推求雨滴个数 n_0 。

(3) 对天然降雨而言,雨滴大小分布不一致,故终点速度 μ 也不同,考虑根据不同直径雨滴出现的概率 P_i ,来推求一个代表雨滴,其直径为 d_d 。

即

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{6} \pi d_d^3 \cdot \mu_d^2 &= \sum \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{6} \pi d_i^3 \cdot \mu_i^2 \cdot P_i \\ d_d^3 \cdot \mu_d^2 &= \sum d_i^3 \cdot \mu_i^2 \cdot P_i \\ d_d &= \frac{\sum \mu_i^2 \cdot P_i}{\mu_d^2} \cdot d_i \end{aligned}$$

用试算法,若已知代表雨滴直径 d_d ,即可根据

公式 $n = \frac{6V}{\pi d^3}$ 求出雨滴个数,并查出 μ_d ,最终计算出

$E = \frac{\rho \cdot \mu_d^2}{2} \cdot \frac{1}{6} \pi d_d^3$ 对于雨滴动能的影响除雨滴直径,天然降雨雨滴直径的分布外还与风力大小和方向有关,风的方向一般与雨滴下落方向垂直,使雨滴方向发生倾斜,速度发生变化,通过计算可求出。

1.2 坡面径流

为了和雨滴击溅力相一致,径流力的衡量也考虑用能量,径流能量的大小,即是同一时刻各点径流相对出口高程的位能叠加,然后在时间上的累积值。

黄土高原产流模式为超渗产流,产流开始后,从分水岭往下,水层厚度逐渐增大,某一时刻,任意一点的水层厚度变为 h_i ,设有一宽度为 B ,坡度为 θ 的坡面,其坡长为 L ,距出口 X 处宽度为 dx 径流段的水深为 $h_i = h \sin \theta$

则微小水体体积 $dv = B \cdot h_i \cdot dx$

其径流能 $dE = dv \cdot \rho_g \cdot X \sin \theta$

将径流能在整个坡面上积分,即可得到此刻整个坡面上的径流能量

$$E = \frac{\rho_g}{2} B L^2 \cdot h_i \sin \theta$$

整个降雨过程中的径流能量为 E 在雨强大于入渗强度时段 t 上的积分,即

$$E = \int_0^t E dt$$

则 $E = \frac{\rho_g}{4} B L^2 \sin 2\theta \cdot Q$

式中: Q ——径流量。

如果从力的角度分析,目前对径流力作用的认识主要分为两大类:一类是所谓的拖曳力;另一类是所谓的剪切力,表达形式较多,需通过分析确定,用力表达的好处是对土粒的受力分析较为方便。

2 侵蚀阻力计算

2.1 土壤黏结力

土壤间的黏结力可以表征土壤对水蚀动力的抵抗作用,其大小与土壤种类、土壤机械组成、有机质含量、土壤密度等一系列因素有关,通过放水冲刷原状土块实验和剪切实验,寻找出一种或几种主要指标反映土壤间黏结力的大小。

2.2 地表摩擦力

同种土壤,在不同地表下,当相同的降雨作用,产生的侵蚀输移结果差异很大;同一地表,因水流的不同(流量、流态、水深)也导致摩擦力的不同,从土壤侵蚀的角度讲,摩擦力用摩阻系数来表达较好,对于坡面薄层水流而言,摩阻系数的推求直接套用流体力学中的曼宁公式不妥。

对于不同地表的凸凹程度,应该有一种量测的方法,如尺杆法或链条法,然后用水流实验来推求系数,即摩阻系数,摩阻系数和量测数据之间可建立某种关系,这种关系式还应加入有关水流的数据(如流量或水深等)。

3 作用过程

3.1 击溅力作用

击溅力的作用主要是用来破坏土壤黏结力,使土壤分散,土粒移动;此外,还可以击实地表,堵塞土壤下渗空隙,产生地表径流,并扰动水流,增强水流的紊动。

土壤黏结力破坏除与雨滴能量有关外,还与土壤的性质、地表坡度等因素有关。首先就单个雨滴击溅产生的土粒重量及溅移距离,建立单个雨滴能量与击溅量的关系,在关系式中应考虑土壤结合力、机械组成和坡度的因素。同时,还可就不同坡度条件下,向上坡、下坡及侧向溅蚀量及距离作概率分布图。场降雨情况下,对单雨滴公式及成果做出修正,即可以应用。在修正时应考虑雨强的作用在降雨能量中的反映就是功率。

对坡面的击实及土壤下渗空隙的堵塞作用可通过下渗实验,从击溅前后下渗率的变化情况及表层土的密度变化来确定,应注意土壤含水量保持在同一水平上。

径流的产生可通过水文计算来确定,但应注意土壤前期含水量的影响,为取得某些参数,下渗实验是必要的。

对水流的扰动作用,可通过不同机械组成的土

壤上覆清水, 变化水层厚度及雨滴大小, 通过观察下部土粒的运动状况, 来确定雨滴对水层的扰动程度及水层对雨滴打击力的削减, 通过公式 $Ft = m_2\mu_2 -$

$m_1\mu_1$ 也可知, $F = \frac{m_1\mu_1}{t}$, 即雨滴打击力随作用时间 t 的增大而减少, 当水层厚度逐渐增大, 水流对雨滴打击力的缓冲作用增强, 对其能量消耗愈大。静水实验不能完全说明运动着的水流因雨滴击溅的扰动作用, 必要时可以通过完全相同的两个坡面, 一个是单纯径流作用, 另一个施加一定的降雨, 但应保持相同的径流量, 通过产沙量的比值来反映雨滴的扰动状态程度, 这个比值最好能和前述清水实验的扰动状态建立某种关系, 若用清水实验即可确定这个比值, 那就很方便了。

3.2 径流力作用

3.2.1 冲刷 径流的作用之一, 就是冲刷土壤, 冲刷力的大小可用其对土壤的剪切力表示。土壤结构受剪切力破坏之后就变成孤立的土粒, 其效果与雨滴击溅作用相同。对于径流剪切力的计算可通过泥沙起动实验来确定, 在原状土的径流小区上通过放水实验, 改变水层厚度(流量)和坡度, 收集出口处不同时刻径流, 对径流中泥沙机械组成及含量分析, 确定径流的剪切力及其作用, 剪切力的大小就是衡量径流冲刷作用的指标。

当有细沟产生时, 细沟中股流的剪切力增大, 此时剪切力主要破坏的是土壤块体间的结合力, 故冲刷量增大, 此时坡面侵蚀量及输移量陡增, 计算的方法可通过前述实验中施放泥水浓度以与出口径流浓度及细沟断面的冲淤情况来确定。

3.2.2 搬运 径流的作用之一就是坡面上因雨滴击溅产生的孤立土粒进行搬运, 搬运能力的大小除与径流能量有关外, 还与径流流量关系密切, 当径流所携带的沙量超过其携沙能力时, 其含沙量就开始下降, 这一段实际上就是沉积过程, 对此过程的研究可通过对坡面不同断面处含沙量随时间的变化情况进行量测, 结合流量、水深、流速等水力要素的观测来进行。在搬运过程的研究中, 应引入拖曳力的概念及表达式, 从理论上对单个土粒的运动进行分析, 结合径流各要素的变化, 从统计的意义上确定各个断面的输移沉积情况。实验前在各断面埋设的稀土示踪元素, 在实验中通过水流携带从出口断面处流出, 分析其各时段泥水样中其含量及流量、含沙量变

化, 即可对理论进行验证或修正。此实验应在不同坡度及不同坡长情况下进行。

当有细沟产生时, 细沟中水流的情况与坡面上有所不同, 由于水流相对集中, 摩擦阻力减小, 水流的携沙能力增强, 一些大颗粒的土粒, 甚至土块也可携带下去, 沉积不易发生, 其携沙能力可借鉴河道中水流有关的计算公式通过修正来使用, 验证及修改在细沟放水实施的基础上进行。配制不同浓度的泥水, 从不同坡度所产生的细沟中流动, 观察记录水流形态、流速、含沙量变化, 最终量测各断面的冲淤, 通过这个实验也可求出各种情况下的最大携沙能力 ρ_{\max} 。

3.3 侵蚀力共同作用

天然降雨情况下, 雨滴击溅力与径流力及侵蚀阻力在坡面共同作用, 诸多影响因素同时参考。

此时, 作用于坡面的侵蚀动力是雨滴击溅力和径流力, 其能量消耗于破坏土壤黏结力、输送土粒或土块和摩擦生热, 剩余一部分能量随出口处径流带出, 因此对侵蚀输移特征的描述或计算, 从能量的角度出发较为适宜, 经过前述分析可以知道, 当能量超过一定限度 E_0 时, 土壤黏结力才能被破坏, 土壤结构的不同将导致黏结力的不同, 雨滴击溅力可增大径流的扰动程度, 同时, 径流对雨滴击溅力也可削弱或消除。对坡面每一段的侵蚀, 可用公式 $E = A \cdot E_{\text{雨}} + B \cdot E_{\text{径}}$ 与土壤特征 K_1 及其它因素综合作用系数 K_2 来计算, 即 $M_s = K_1 K_2 (E - E_0)$ 。对输移可通过侵蚀量、径流量计算含沙量 ρ , 通过不同情形下, 最大携沙能力 ρ_{\max} 与 ρ 的差值, 计算输移量及沉积量, 对整个坡面不同断面在不同时刻的分析即形成坡面侵蚀输移特征。

同理, 当有细沟产生时, 坡面侵蚀量加上细沟股流的冲刷量即构成侵蚀量; 输移量此时则主要依据细沟股流的携沙能力而定。

4 力能作用效果定量描述

由于自然侵蚀过程的复杂性, 对于力能及作用效果如果定量来描述, 涉及到一系列参数值或临界值的取值, 对于不同的侵蚀环境或侵蚀对象, 这些数值有相当大的差异, 对于具体数值可通过一系列实验来确定(见表1)。

表 1 确定力能及作用效果数学表达式中参数的实验

力能及效果	表达式	实验内容	测试目的
单雨滴击溅 能量	$E = \frac{1}{2} m \mu^2$ $m = V \cdot \rho,$ $V = \frac{1}{6} \pi d^3$	单雨滴观测	用滤纸法测雨滴直径 d ; 量杯测 100 滴雨滴体积, 求出 V ; 测其终速 μ (或参照有关资料)
均质场降雨 能量	$E = n \cdot \frac{1}{2} m \mu^2$ $= \frac{1}{2} n \cdot V \cdot \rho \cdot \mu^2$ $n \cdot V = P \cdot A$	雨滴发生器实验 (lm^2)	测降雨量 P , 针头个数 n_1 , 每个针头产生雨滴的大小 d 及个数 n^2 $n = n_1 \cdot n_2$
天然场降雨 能量	根据不同直径雨滴出现的概率 p_i , 来 推求代表雨滴直径 d_d $\frac{1}{2} \rho \cdot \frac{1}{6} \pi d_d^3 \cdot \mu_d^2 = \sum \frac{1}{2} \rho \cdot \frac{1}{6} \pi d_i^3 \cdot \mu_i^2 \cdot P_i$ $d_d^3 \cdot \mu_d^2 = \sum \frac{d_i^3 \cdot \mu_i^2 \cdot P_i}{\sum \mu_i^2 \cdot P_i}$ $d_d = \sqrt[3]{\frac{\sum d_i^3 \cdot \mu_i^2 \cdot P_i}{\sum \mu_i^2 \cdot P_i}}$ $n = \frac{P \cdot A}{V}$ $V = \frac{1}{6} \pi d^3$	天然降雨观测	滤纸法测面积 A 上天然降雨的不同直径雨滴分布概率 P_i , 降雨量 P , 雨强 I
单雨滴击溅力、作用时间 及径流影响系数	$F t = m_2 \mu_2 - m_1 \mu_1$ $t = \frac{m_1 \mu_1}{F}$ $\epsilon = f(h, d) = \frac{E_2}{F_1}$	单雨滴击溅力	记录电子天平读数 F , 换置不同结构土壤计算不同下垫面下的作用时间 t 天平上置换不同土层厚度的水盘, 测土层厚度 h 对不同雨滴 d 击溅力的影响 (极大值点, 极小值点) ϵ
场降雨击溅力		雨滴发生器 天然降雨	同上
单雨滴击溅侵蚀的临界 能量 E_0 , 单位能量产生的 击溅量系数 W_1	$E = \sum m_i (1 + D_i) g L_i + E_0$ $E_0 = E - \sum m_i (1 + D_i) g L_i$ $W_1 = \frac{M_{s1}}{E - E_0}$	单雨滴击溅过程	击溅所产生土粒的抛射距离、数量及机械组成
单位场降雨 能量产生击 溅量系数	$E_0 = n \cdot E_0$ $W_1 = \frac{M_{s1}}{E - E_0}$	场降雨击溅过程	击溅所产生土粒的抛射距离、数量及机械组成
土壤抗剪强度(力)	$F = f(\text{黏粒含量, 有机质, } D^i)$ 建立 E_0 及 W_1 与 F 关系式 $E_0 = f(F)$ $W_1 = f(F)$	土壤抗剪	测土壤结构及含水量与抗剪强度的关系
雨滴对径流 扰动系数	$\epsilon = \frac{M_{s2}}{M_{s2}} = f(d, \lambda, T, \dots)$	雨滴扰动	不同机械组成土粒上覆清水, 改变土层厚度观察击溅后扩散范围 λ 及重新静止所需时间 T ; 场降雨作用前后测两个相同坡面的产沙量 $M_{s2}; M_{s2}$
坡面径流起 动流速	$v_0 = f(D, Y_s)$ 原状土 $V_0 = k_1 \cdot f(D, Y_s)$	起动实验	不同水深、坡度下先用级配土, 然后用原状土。测流速、径流, 含沙量过程, 对过程样分析

(下转第 62 页)

参考文献

- 1 李守谦, 兰念军. 中国小麦栽培研究新进展[M]. 北京: 农业出版社, 1995
- 2 晋凡生, 黄明镜等. 地膜穴播冬小麦生物学特性及增产机理[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3)
- 3 樊廷录等. 旱地地膜小麦研究进展及进一步加快发展建议[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 15(1)
- 4 冷石林, 韩仕峰等. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996
- 5 王龙昌, 贾志宽等. 北方旱区农业节水技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998
- 6 侯保俊, 王秀琴等. 大同地区春小麦全生育期地膜覆盖技术的实践与推广[J]. 麦类作物, 1999, 19(3)
- 7 王勇, 樊廷录等. 旱塬冬小麦增产机理研究初报[J]. 西北农业大学学报, 1998, 7(4)
- 8 高成芳, 田晓峰等. 旱地小麦覆膜沟穴播集雨增产技术多点实验研究及生产示范[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2)

(上接第 26 页) 续表 1

坡面径流挟沙能力	推移力 $F_t = \lambda_t \cdot d^2 \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad \rho_{\max} = f(F_t, F_s) =$ $f(d, v)$ 上举力 $F_s = \lambda_s \cdot d^2 \cdot \frac{\rho V^2}{2}$	径流作用过程	在不同坡度坡面上, 径流作用下, 先用同一粒经松散土粒, 后用级配松散土粒, 测流速、径流量及最大含沙率
地表糙度对水流作用系数	$V = C \cdot R^{\frac{1}{6}} J$ $C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$ $R = \frac{VR}{\gamma}$ $V = K \cdot q^n \cdot J^m$ 层流 $V = \frac{1}{3\mu} \gamma_0 h^2 J$ 紊流 $V = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}$ $K_2 = f(N, h)$	不同地表糙度下, 径流实验	流速、流态参数测量计算, 筛选出测量地表糙度的方法, 建立所测数值 N 与 K_2 的关系式
细沟中股流作用系数	$E = Q \cdot \rho \cdot g \cdot L \sin \theta$ $\rho_{\max} = f(d, v)$ $E = \frac{1}{2} Q \cdot \rho \cdot v^2$ $J_0 = \lambda_0 R J$	细沟实验	改变坡度、流量, 测各段流速、流量及断面冲淤量可知其剪切、冲刷与能量关系, 然后改放不同浓度泥水, 可知其最大挟沙能力及输移量
坡面径流能量	$E_{\text{径}} = \frac{\rho g}{4} B L^2 Q \sin 2\theta$	人工降雨情况下, 自然坡面的径流、侵蚀、输移实验	断面测含沙量、水深、流速、径流及含沙量过程, 对公式中有关参数率定分析其作用过程
坡面径流启动消耗能量	$E_1 = \frac{1}{2} Q \cdot \rho \cdot v_0^2$ $= \frac{\lambda k_1}{2} Q \cdot \rho \cdot f^2(D, \gamma_s)$		
坡面径流剪切消耗能量	$E_2 = \frac{1}{2} Q \cdot \rho \cdot v_0^2$ $= \frac{\lambda k_2}{2} Q \cdot \rho \cdot f^2(D, \gamma_s)$ $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$		
坡面径流输移能量	$E_{\text{输}} = E_{\text{径}} - (E_1 + E_2) \quad W_2 = \frac{M_{\text{输}}}{E_{\text{输}}}$ $W_2 = f(\rho, \rho_{\max})$		
各种力共同作用下的侵蚀输移过程及量值	降雨 $M_{s1} = W_1 (E_{\text{雨}} - E_0)$ 径流 $M_{s2} = W_2 [E_{\text{径}} - (E_1 + E_2)]$ 相互作用后 $M_{s1} = w_1 \cdot \epsilon_1 (E_{\text{雨}} - E_0)$ $M_{s2} = w_2 \cdot \epsilon_2 [E_{\text{径}} - (E_1 + E_2)]$ $M_s = M_{s1} + M_{s2}$		