

## 坡面水土迁移动力学理论及发展

洪天求<sup>1</sup>, 胡宏祥<sup>1,2</sup>, 马友华<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘 要:**水土迁移会产生水土资源的重新分配, 也会对周围环境产生重大的影响。结合国内外坡面径流动力学与土壤侵蚀动力学的研究进展, 论述了坡面水土迁移过程的动力学特征和运动方程等理论, 展望了水土迁移过程的动力学发展前景。

**关键词:**水土迁移; 动力学; 坡面; 径流; 土壤

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2008)02-0124-05

## The Dynamics Theory and Research Advances of Overland Soil and Water Transference

HONG Tian-qiu<sup>1</sup>, HU Hong-xiang<sup>1,2</sup>, MA You-hua<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Soil and water transference can not only redistribute the resource of water and soil, but also bring great influence on ambience. Combining research advances about overland flow dynamics and soil erosion dynamics in the world, the paper discussed dynamics characteristic and movement equation the theory of soil and water transference in overland. Finally the future trends of soil and water transference dynamics were discussed.

**Key words:** soil and water transference; dynamics; overland; flow; soil

坡面是构成低山、丘陵的重要景观单元, 坡面上的水土迁移不仅对坡面的发育变化有重要影响, 而且也对周边的生态环境产生重要影响。坡面径流是坡面上土壤迁移的主要外动力, 也是坡面上水资源在地表水平移动的重要形式。坡面径流水深一般较小, 流动边界条件复杂, 受雨滴击溅作用明显, 其水力学特性主要取决于降雨强度和历时、土壤质地或种类、土壤前期含水量、植被盖度和类型、坡面随机糙率、坡度和坡长及边界稳定性等。为了从动力学机理上更深刻的认识水土资源的迁移过程, 近年来国内外学者<sup>[1-5]</sup>开始重视从坡面径流的动力学角度开展水土迁移过程的研究。因此结合以前研究工作, 总结国内外的最新研究成果, 对于进一步开展水土保持工作, 具有重大而深远的意义。

### 1 坡面径流的形成与特性

#### 1.1 降雨过程

降水雨滴直接打击坡面薄层流及土壤表面上, 使水流发生扰动及土壤颗粒分散和移动。降雨特性对雨滴击溅、土壤的迁移有重要影响<sup>[1]</sup>, 雨滴击溅和雨滴物理性质关系密切, Sharma 等、周伏健等<sup>[5]</sup>分别通过实验测定了当地天然雨滴的特性, 并给出了中值粒径与雨强的关系式。姚文艺<sup>[6]</sup>研究表明: 降雨的击溅作用不但增大浅层水流的径流量, 且增大

水流阻力, 这与 Emmett 及 Thornes 基本一致, 但吴普特等<sup>[7]</sup>研究表明, 降雨的击溅作用可减小薄层水流的水流阻力; 张科利<sup>[8]</sup>曾指出降雨量与侵蚀量之间的相关性并不大, 相同雨量可能造成侵蚀量不同, 能够产生侵蚀的降雨量或降雨强度才被称为侵蚀性降雨。降雨过程, 即降雨强度与降雨量的组合情况会对坡面侵蚀和坡面径流的产生有重大影响。

#### 1.2 入渗过程

入渗过程是指雨水或坡面水流进入土壤的过程。它能够影响产沙量的多少, 从而对坡面的水土迁移量有极大影响。水分向土壤中的入渗速率和入渗量, 取决于供水速度、供水时间和土壤对水分的渗透吸收能力, 供水速度由降水强度决定, 而土壤的渗吸能力取决于土壤自身的理化特性<sup>[9]</sup>。入渗是流体在多孔介质中的一种运动方式, 这种过程一般符合 Darcy 定律, 而对降雨入渗过程的一般认识是: 降雨初期土壤入渗能力很强, 大于降雨强度值, 土壤的实际渗透率即等于降雨强度值。随着入渗量增加, 土壤入渗能力逐渐减小, 当入渗率减小至等于降雨强度后, 土壤实际入渗率开始小于雨强, 地表将会产流, 此后入渗率仍不断减少, 并沿一条下凹曲线逐渐趋于一个稳定值。增加入渗量是目前控制坡面流量及减少水土流失的重要手段。

收稿日期: 2007-05-15

基金项目: 科技部基础研究重大项目前期研究专项(2003CCC00400); 安徽省自然科学基金资助项目(03045204)

作者简介: 洪天求(1953—), 男, 安徽怀宁人, 博士生导师, 主要从事土壤地理与水土保持方面的研究。E-mail: hongtianqiu@sina.com

通信作者: 胡宏祥(1971—), 男, 安徽长丰人, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与农业环境生态等研究。E-mail: huhongxiang@ahau.edu.cn

目前使用的反映入渗特征的公式既有理论型公式,也有经验公式,其中理论公式有:Green-Ampt 公式、Philip 公式和 Smith-Parlange 公式;经验型公式有:Kostiakov 公式、Horton 公式和 Holtan 公式等。Green-Ampt 公式是最早的基于物理过程和毛管理论入渗模型,较好地考虑了土壤饱和和导水率、有效孔隙率、初始含水量和累计入渗量对入渗过程的影响。针对初始干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题,假定入渗时存在着明显的水平湿润锋面,将湿润和未湿润的区域截然分开,然后运用达西定律得到入渗率与入渗量的关系及随时间的变化过程。

$$i = \frac{dI}{dt} = K[1 + (\theta_s - \theta_i) \cdot S/I]$$

$$I = Kt + S(\theta_s - \theta_i) \ln[1 + \frac{I}{S(\theta_s - \theta_i)}]$$

式中:  $K$ ——土壤饱和和导水率(渗透系数)(m/s);  $\theta_s$ ——土壤饱和含水率,即有效孔隙率(%);  $\theta_i$ ——土壤初始含水率(%);  $S$ ——土壤吸力(m);  $I$ ——累积入渗量(m)。

Green-Ampt 模型是干土积水入渗模型,在整个入渗过程中地表始终有积水,而实际的降雨入渗过程并非如此,因此 Mein 等<sup>[10]</sup>将其改进使用于降雨情形。由于实际降雨不会是均匀的强度,Chu<sup>[11]</sup>进一步将 Green-Ampt 模型推广至降雨强度随时间变化的情况,其后该公式又被推广到土壤性质不均一的分层土壤中<sup>[12]</sup>,也有人使用被简化的 Green-Ampt 公式<sup>[15]</sup>

$$I = A + B/t$$

式中:  $I$ ——入渗率;  $t$ ——降雨开始后时间;  $A$ ——最终入渗率;  $B$ ——与土壤初始水分没饱和有关的参数。

Philip 公式是根据土壤水分运动方程,并假设垂直入渗条件下的解为级数形式而得出的。当其级数解取两项时,得到下列入渗率表达形式

$$i = A + \frac{B}{\sqrt{t}}$$

式中:  $A$ ——最终入渗率;  $B$ ——与土壤初始水分有关的参数。

Smith 和 Parlange 也从土壤基本方程出发,通过一种半解析迭代方法,导出了任意降雨强度下的入渗公式,对于非饱和和导水率在接近饱和的范围内不同变化规律,其公式有不同的形式。对于经验公式的情况是:

$$\text{Kostiakov 入渗公式} \quad i = Bt^{-\alpha}$$

$$\text{Horton 入渗公式} \quad i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-\beta t}$$

$$\text{Holtan 入渗公式} \quad i = i_c + \alpha(W - I)^n \quad W = (\theta_s - \theta_i)d$$

式中:  $\theta_s$ ,  $\theta_i$ ——土壤饱和含水率和土壤初始含水率(%);  $d$ ——土壤厚度;  $I$ ——入渗量;  $i_0$ ——初渗率;  $i_c$  为稳渗率;  $\alpha, \beta, n$ ——经验参数,一般由实验或实测资料来确定。

Green-Ampt 公式由于具有相当的物理基础,公式形式简单,也有许多后续研究工作,因此受到广泛的重视与使用。Horton 公式,也是常用的公式,尤其在中国的运用很广泛,但它属于经验公式,所涉及参数并非土壤特性参数,因而不一定具有通用性。在国内,一些学者通过对具体对象的入渗过程的观测和研究,也得到了不少适合不同地域的经验公式<sup>[14]</sup>。对于入渗过程中涉及的主要物理参数取值方面,也

有不少学者进行了研究<sup>[15-16]</sup>;并且蒋定生<sup>[17]</sup>研究了斜坡对入渗率的影响,给出了相应的经验公式。

### 1.3 坡面流的产生

坡面流是指在重力作用下顺坡面流动的浅层水流,在分水岭附近呈均匀覆盖的水层,称为片流,当形成细沟时则集中在细沟内流动,称为细沟流。也有人在研究中,对片流和细沟流通常不加区别,统称为坡面流。坡面产流之后,先呈漫流,因坡面微地形的不均匀性,使漫流分为一股股时分时合的辫状细水流。细沟间的水及泥沙愈来愈集中于细沟中,细沟流的流量、流速逐渐增大,最终发展为浅沟和切沟。

早期对坡面流的研究主要是经验性的定性描述,在 20 世纪 30 年代 Horton 才真正开始了坡面流的定量描述研究<sup>[18]</sup>,他认为坡面流是一种混合状态的水流,稳定状态的坡面流水深可以近似用河道水流公式估算,不论是层流还是湍流,均可写为  $q = kh^m$ ,式中:  $q$ ——单宽流量;  $h$ ——水深;  $k$ ——反映床面特性、坡度、水流类型及黏性的综合系数;  $m$ ——反映湍动程度的指数,层流时取 3,湍流时取 1.67,混合流时取 1.67~3,利用上述公式,结合流量沿程增加方程  $q = xq^*$ (式中:  $q^*$ ——净雨量,即降雨强度与土壤入渗率的差值,  $x$ ——沿坡面的距离),即可求得坡面流的沿程水深、流速和切应力等水力要素。Yoon 等<sup>[19]</sup>将坡面流看作流量沿程增加的空间变量流,Yen 等<sup>[20]</sup>进一步考虑到降雨对坡面流的影响,根据动量原理,推导出了有降雨情况下的一维坡面流运动方程;吴长文<sup>[21]</sup>和王协康等<sup>[22]</sup>也陆续根据坡面流的特征建立简化的坡面流基本方程,并对近似解进行了研究。

### 1.4 坡面流的水动力学特性

#### 1.4.1 坡面径流的流态

研究中常用惯性力和黏滞力的比值即雷诺数  $R$  来判断水流的流态。如果惯性力远超过黏滞力,如河道流和浅沟流,雷诺数将很大且此时流态为紊流;反之为层流<sup>[23]</sup>。

目前对坡面流的流态问题研究分歧较大。Horton 认为坡面流是一种混合状态的水流,即完全紊流区上附带少量层流区,这与郑良勇<sup>[24]</sup>研究黄土区后得出结论,陡坡径流的流态属于急紊流一致。Emmert<sup>[25]</sup>通过实验认为,它是一种“扰动流”。吴普特、周佩华<sup>[26]</sup>认为坡面流虽然受到降雨和坡面糙率的扰动,但仍属层流范畴,因此称坡面流为“搅动层流”。而江忠善<sup>[27]</sup>等则认为坡面流是介于层流到紊流之间的过渡流;陈国祥和姚文艺<sup>[6]</sup>将降雨扰动下的坡面流定义为“伪层流”,即雨滴扰动使水质点有局部混掺现象,但整体水流仍处于层流状态。Selby<sup>[29]</sup>认为坡面流是层流和紊流的混合。

综合过去的研究,对坡面流流态认识的不一致主要在于对雨滴打击作用对坡面流流动影响的认识不同,当流动在临界雷诺数以上时,流动为湍流是无疑的;在过渡区,坡面流处于层流与湍流之间也相对比较明确,问题的关键在于,当流动的雷诺数处于层流区时,由于水流受雨滴扰动而变得紊乱,其流态是否与层流不一致是一个值得深究的问题。

#### 1.4.2 坡面径流的流速

坡面流流速是研究坡面侵蚀动力和机理的最重要因素,

它主要受地表特征、坡度和坡面流量等因素影响。由于坡面径流在流动过程中受地形影响大,边界条件复杂,水流泥沙含量沿程变化大。因此,流速沿程变化及随时间变化复杂,研究起来比较困难。

目前还没有测定坡面流流速的精确方法。常用流速的测定方法有颜料示踪法、盐溶液法和热膜速度测定仪法<sup>[42]</sup>。其中颜料示踪法是最常用的野外坡面流速测量法,所测得的都是最大表层流速,分别乘以系数 0.67, 0.70, 0.80 即得层流、混合流及紊流的坡面水流平均流速。

自 20 世纪 30 年代起,国内外许多学者就针对坡面流流速开展了大量的研究工作,取得了一些可喜的研究成果。如国外普罗托季亚科夫、维利坎诺夫、张庭英、斯里伯纳依、Savat 等,先后从理论上或半理论上求解坡面流的流速,但所得计算公式或方法,有的很复杂,有的应用限制太多。江忠善<sup>[27]</sup>在全面统计与分析国内外坡面流研究资料后,在考虑坡面流流态的基础上将国内外坡面流流速公式概化为统一的形式:  $V = Kq^n S^m$ , 式中:  $K, m, n$ ——参数;他还根据坡面流的不稳定流计算理论,结合所收集到的国内外坡面流流速资料和自己的试验成果,拟合出了坡面流流速的计算公式:  $V = 2.0q^{0.5} S^{0.35}$ 。但是 Covers<sup>[30]</sup>和 Nearing 等<sup>[31]</sup>的近期研究发现,细沟内水流速度与坡度无关,仅是流量的简单函数,他们认为这与侵蚀细沟的阻力组成有关。近年来,吴普特<sup>[32]</sup>、姚文艺<sup>[33]</sup>等对坡面流流速也分别进行了试验测定和分析,并推出了各自的坡面流流速公式,但是各坡面流流速公式仅适用于推求整个坡面水流的平均流速,而没有反映流速在整个坡面上的时空变化。

#### 1.4.3 流量及泥沙

Selby<sup>[34]</sup>认为霍顿坡面流的厚度一般不超过 10 mm,但坡面水深随坡形、土壤入渗能力、坡段位置及降雨强度的变化而变化。Julien<sup>[23]</sup>运用量纲分析建立了坡面流输沙能力的无量纲关系式。Grosch<sup>[50]</sup>研究了陡坡地的坡面流与泥沙搬运的关系,Abrahams<sup>[36]</sup>实验证实:由于坡面流中细沙颗粒常以跃移搬运为主,而且常非单独跃移,泥沙含量与颗粒运动速度呈反比关系。

#### 1.4.4 坡面流阻力

目前尚无较好的描述坡面流阻力规律的公式,实际常常利用 Chezy 公式或 Manning 公式进行简化计算,但对阻力系数的探讨一直使用 Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$ 。目前认为坡面流的阻力来源于以下 4 个方面:颗粒阻力、形态阻力、波阻力和降雨阻力<sup>[37]</sup>。根据阻力来源的不同可以将 Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$  分割为不同的部分。利用模拟降雨试验研究表明的  $Re < 900$  的阻力系数  $f$  与呈 -1 次方的关系,但其系数与雨强和坡度有关。尽管各国学者已经对坡面流的阻力问题进行了深入研究,但由于问题的极端复杂性,目前尚无成熟而广泛适用的 Darcy-Weisbach 阻力系数公式,实际研究中仍使用简单的 Manning 公式。

#### 1.5 细沟流水动力特性

细沟是在坡面径流差异性侵蚀条件下,在坡面上产生一种小的条状沟槽地形,其纵剖面与所在斜坡纵剖面一致,并

能为当年犁耕所复平。坡面细沟侵蚀是坡面径流汇成股流,沿坡面下泄过程中分散、分离及输移土壤的过程。

目前对细沟流水力学的研究还较少,借鉴河道中河相关系式的表达形式,一些研究者用下述指数关系来描述细沟流的几何与流动关系。  $B = aQ^b$ ;  $h = cQ^d$ ;  $U = eQ^m$ ; 式中:  $B, h$ ——细沟的宽和深;  $Q, U$ ——细沟的流量和流速;  $a, b, c, d, e, m$ ——经验系数,且满足  $a \cdot c \cdot e = 1, b + d + m = 1$ 。Gilley<sup>[38]</sup>与 Govers<sup>[39]</sup>研究了形成于缓坡上的细沟水动力学特征,结果表明系数  $b$  在 0.14~0.48 之间,平均为 0.3;系数  $m$  在 0.23~0.39 之间,平均值也近似为 0.3,因此  $d$  平均值为 0.4。Govers 的结果还表明  $m$  不受坡度影响,稳定在 0.3 左右。Abrahams<sup>[40]</sup>研究了草地上的细沟水流后得到  $b, d, m$  分别为 0.33, 0.34, 0.33。张科利测量了一系列黄土坡面细沟流,发现  $Fr$  数全大于 1,  $Re$  数均在 1 000 以上,认为其处于急湍流范畴。通过试验得到  $b, d, m$  分别为 0.26, 0.48, 0.26, 并进一步考虑了坡度的影响。

## 2 坡面流的模型研究

坡面流的描述一般均使用完整的圣维南 (Saint-Venant) 方程,其基本方程组为

$$h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + i \frac{v}{h} + g(S_f - S_0) = 0$$

式中:  $h$ ——水深;  $v$ ——平均流速;  $i$ ——净雨量;  $t$ ——时间;  $g$ ——重力加速度;  $S_0$ ——地表坡度;  $S_f$ ——能坡。此方程组模拟坡面水流运动的适用条件为坡度  $< 3^\circ$  的缓坡,但经过外延后方程组可以应用于陡坡。

完整的圣维南方程为非线性偏微分方程组,只有在简单的初始条件与边界条件下才可以直接求解,而实际的坡面水流在运动时因边界条件和初始条件很复杂,难以直接求解。因此国外近年来广泛运用由圣维南方程简化而成的非线性运动波方程来研究坡面流。运动波模型最早是由 Lighthill 与 Witham 提出的,其基本思想是在圣维南方程组的动力方程中忽略各导数项,用底坡等于能坡的关系代替原动力方程,得到一个流量和水深的指数关系。扩散波模型是在运动波模型简化时多考虑了水深沿程变化项,即压力梯度,它较运动波模型更接近圣维南方程的解,适用范围也更广泛。Morris<sup>[41]</sup>, Govindaraju<sup>[42]</sup>都相继研究了扩散波模型。Frati 等<sup>[43]</sup>基于实验,推导出坡面流及坡面侵蚀过程模型,由 5 个方程组成:①水流连续方程(矩形细沟);②渐变流中可用能量方程代替动量方程;③曼宁方程;④泥沙连续方程;⑤均衡细沟坡面方程。

综上所述,简单坡面上的坡面流模拟及预报研究相对比较完善,但复杂坡面条件下的坡面流描述及模拟预报仍然很不成熟,将是今后坡面流模拟预报的研究热点。

## 3 坡面土壤的迁移动力学

根据土壤迁移的动力学和方式的不同,土壤迁移方式可分为雨滴溅蚀、面蚀(片流侵蚀)、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀等。除雨滴溅蚀是由于雨滴打击和分散作用造成的外,

其他侵蚀方式是坡面流不同流动形式造成的,根据坡面流流动发展过程,也造成了面蚀(片流侵蚀)—细沟侵蚀—浅沟侵蚀—一切沟侵蚀,逐步发展的过程。

### 3.1 结皮

在雨滴打击作用下,由于大气尘埃与枯枝落叶沉积,在微生物作用下,土壤表层容易形成一层很薄的致密层,称为土壤的表层结皮,对坡面产流和土壤移动有很大的影响。自20世纪40年代以来,众多学者对结皮层的形成,以及对土壤入渗和迁移的影响进行了研究<sup>[44-46]</sup>。结皮过程受土壤组成、降雨、坡度以及生物残骸和植物根系残留物化学作用等因素的影响,十分复杂。一般来讲,结皮层对土壤侵蚀的影响主要有两个方面:一是减少入渗量,增加产流量,因而增加了径流的剪应力及径流的输沙能力;二是使土壤表层变得致密坚实,增加了抵抗侵蚀能力。但由于结皮影响所产生的侵蚀量在土壤侵蚀中所占的比重,结皮影响土壤侵蚀的机理还不是十分清晰<sup>[47]</sup>,所以至今对结皮层影响入渗和侵蚀的定量描述仍相对缺乏,同时在正确解析土壤侵蚀过程及准确预报土壤侵蚀物理模型方面也明显不足。

### 3.2 溅蚀

溅蚀是指雨滴直接打击土壤表面,使土壤颗粒发生分散和移动的过程。雨滴击溅的作用主要是分离土壤颗粒,进而由坡面水流输送走。它是坡面土壤侵蚀,特别是片流侵蚀的主要物理过程,坡面流和细沟流输移的大多数土壤颗粒首先要经过雨滴的分散过程,溅蚀可为径流输沙提供丰富的溅松物质。

早在20世纪40年代就有学者研究认为雨滴溅蚀取决于雨滴动量、降雨强度及土壤特性,并通过资料分析建立了雨滴溅蚀总量与雨滴速度、雨强关系的经验公式。但总体上看,坡面溅蚀量研究主要集中在降雨特性、地形因子、土壤特性、植被覆盖等与溅蚀量的相关分析上,多数研究单纯地将溅蚀量与一个指标联系起来,以寻找衡量土壤溅蚀性的定量指标,今后雨滴击溅的力学过程及雨滴打击与薄层水流输沙的关系仍值得进一步深入研究。

### 3.3 片流侵蚀

片流侵蚀是指沿坡面运动的薄层水流对坡面土壤的分散和输移过程。一般在坡面上部没有细沟的区域和下部的细沟间部分,土壤侵蚀以片流侵蚀的方式发生,或称沟间侵蚀。目前大多学者认为片流侵蚀的主要根源是雨滴对土壤的分离,片蚀过程中的水流对土壤的分离能力较小<sup>[48]</sup>,土粒的输运由雨滴和水流共同进行,且片流是沟间地泥沙输移的主要动力。雨滴本身的输运能力主要取决于其顺坡方向的速度,一般认为很小,水流本身仅能输送小颗粒的悬移质,推移质不能被坡面流单独输运,只有雨滴击溅将之抬起后才能被水流输移,这种流动被称为降雨诱发的水流输移<sup>[49]</sup>。当坡面没有细沟发生时,这种输运方式占主导地位,地表会发生不易察觉的降低,整个坡面被成层地侵蚀掉了。今后注意薄层水流与迁移泥沙的规律是研究的一个重要方向。

### 3.4 细沟侵蚀

细沟侵蚀是指坡面流逐渐汇集成股流以后,冲刷搬运土

壤的一种侵蚀方式。关于细沟的形成,目前认为大致有两种途径:一是在雨滴击溅,坡面微地貌导致径流集中及水流本身的不恒定不均匀等因素单独或共同作用下,局部土体被水流破坏,形成小侵蚀穴。由于其头部的跃水,水流在小侵蚀穴中发生掏蚀,使其不断扩大加深,产生溯源侵蚀,逐渐形成细沟。二是由于土壤失陷,水流汇集而成壤中流,壤中流在下坡段流出地表,细沟顺其出口发育,同时壤中流管道顶部塌陷,形成小跌坎,而后溯源侵蚀形成细沟。细沟发生的临界动力学条件一直有很多不同研究和结果,因为尽管对细沟发生临界及细沟侵蚀过程进行了大量的研究,但迄今为止,坡面侵蚀过程由片状侵蚀转化为细沟侵蚀作用这个“质变点”,仍未得到合理解释,这在一定程度上影响了坡面过程研究和有关预报模型的建立。

## 4 坡面水土迁移能力公式

不论是沟间侵蚀还是细沟侵蚀,坡面流的输移能力都是一个重要参量。Smart<sup>[50]</sup>发现,由于坡面流与河道水流的差别,用河道输沙公式直接模拟坡面流输移能力会有较大误差。Alonso等<sup>[51]</sup>检验了9个河流输沙力公式,Moore等发现基于水流单位能量概念的Yang公式既能较好模拟片流输沙也能对细沟流输沙得到较好结果。Govers<sup>[39]</sup>认为以往检验公式时所使用的资料范围均较窄,并用水槽研究5组分类良好的粉沙和沙子的挟沙力,形成一般形式的挟沙力的方程: $T=Aq^BS^C$ ,式中: $A, B, C$ ——参数,随着土壤颗粒直径变化,同时与水流流态有关; $q$ ——单宽流量; $S$ ——坡度。汤立群和陈国祥<sup>[52]</sup>建立了一个坡面径流侵蚀力公式,总的来讲,对坡面流输沙公式的研究主要集中于对明渠水流输沙公式在坡面流中适用性的校验,完全针对坡面流输沙的研究十分有限,直至目前仍缺乏有代表性的研究和进展。

## 5 问题及展望

(1)由于坡面水土迁移过程涉及地貌学、土壤学、地质学、水利学、物理力学与生物学等学科,要用重力学、水动力学、土动力学,甚至生物动力学来分析与解释相关的运动与机制问题,因此如何把多学科的综合知识运用起来,结合室内外的调查与试验,将是坡面水土迁移过程及其动力学研究获得突破的难点和关键。

(2)由于研究坡面本身及其外部环境的差异很大,增加了水土迁移过程的相关模型建立的难度。考虑的条件差异及影响因素少,建立起来的模型简单,但通用性差;而通用性好的模型,则需要考虑多因素,增加了建立模型的难度,况且建立的模型有时也不容易求解。例如圣维南方程及其简化形式如何与实践结合就是当前的一个焦点。

(3)如何把理论与实践结合,不断验证与完善理论,尤其把人类活动对坡面水土迁移的影响加以重视,也是今后发展的一个研究方向。

(4)运用现代化的监测技术与测试手段,加强对水土迁移的研究与分析,把定性的、经验性研究转向定量的、理论化研究,将是坡面水土动力学的研究趋势。

### 参考文献:

- [1] Cochrane T A, Flanagan D C. Detachment in a simula-

- ted rill[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(1): 111-119.
- [2] 张科利,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学实验研究[J].土壤学报,2000,37(1):9-15.
- [3] 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[J].水土保持研究,2006,13(4):264-267.
- [4] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26,47.
- [5] 周伏建,等.福建省天然降雨雨滴特征的研究[J].水土保持学报,1995,9(1):8-12.
- [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,周佩华.雨滴击溅对薄层水流水力摩阻系数的影响[J].水土保持学报,1994,8(2):39-42.
- [8] 张科利.黄土坡面侵蚀产沙分配及其降雨特征关系的研究[J].泥沙研究,1991(4):39-46.
- [9] 王全九,邵明安,汪志荣,等. Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算的应用[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):66-70.
- [10] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resour. Res., 1973, 9(2): 384-394.
- [11] Chu S T. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resour. Res., 1978, 14(3): 461-466.
- [12] Tan K A, Rudra R P, Dickinson W T, et al. The experimental procedure for the verification of Green and Ampt equation[J]. Canadian Society of Agricultural Engineering Paper, 1987: 87-304.
- [13] Scoging Helen. Modelling overland-flow hydrology for dynamic hydraulics[M]//Parsons A J, Abrahams A D, eds. Overland Flow. London: UCL Press, 1992: 89-103.
- [14] 陈丽华,余新晓.晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J].北京林业大学学报,1995,17(1): 42-47.
- [15] Neuman S P. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt[J]. Water Resour. Res., 1976, 12(3): 564-566.
- [16] Brakensick D L. Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation[J]. Water Resour. Res., 1977, 13(3): 680-682.
- [17] 蒋定生,等.黄土高原水土流失与治理模式[M].北京:中国水利水电出版社,1997:9.
- [18] Horton R E, Leach H P. Laminar sheet flow[J]. Trans. Am. Geophys. Union., 1934, 15(2): 393-404.
- [19] Yoon Y N, Brater E F. Spatially varied flow from controlled rainfall[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1962, 97(HY9): 1367-1386.
- [20] Yen B C, Wenzel H G. Dynamic equations for steady spewtially varied flow[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96(HY3): 801-814.
- [21] 吴长文,王礼先.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J].水土保持学报,1995,9(6):32-38.
- [22] 王协康,敖汝庄,喻国良,等.坡面雨滴溅蚀及其输沙能力的探讨[J].四川联合大学学报:工程科学版,1999,3(3):7-12.
- [23] Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow[J]. American Society of Agricultural Engineers., 1985, 28(3): 755-762.
- [24] 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.
- [25] Emmett W W. Overland flow[M]//Kirkby M J. Hill slope hydrology. New York: John-Wiley and Sons., 1978.
- [26] 吴普特,周佩华.黄土坡面薄层水流侵蚀实验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):40-45.
- [27] 江忠善.坡面流速研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(7):46-52.
- [28] 陈国祥,谢树楠,汤立群.黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究[M]//孟庆枚.黄土高原水土保持.郑州:黄河水利出版社,1996.
- [29] Selby M J. Hill slope materials & processes[J]. Oxford University Press, 1993.
- [30] Covers Gerard. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow[M]//Parsons A D, Abrahams A D. Overland flow. UCL Press, 1992: 243-273.
- [31] Nearing M, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill slope[J]. Earthe. Processes and landforms, 1999, 24: 677-686.
- [32] 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].水土保持学报,1998,4(2):92-94.
- [33] 姚文艺.坡面流流速计算的研究[J].中国水土保持,1993(3):21-25.
- [34] Selby M J. Hill slope materials & processes[M]. Oxford University Press, 1993.
- [35] Grosh J L, et al. Interr erosion and runoff on very steep slopes[J]. Trans of the ASAE, 1994, 37(4): 1127-1133.
- [36] Abrahams A D, et al. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow[J]. Water Resource Research, 1993, 29(9): 1919-1927.
- [37] Abrahams Athol D, Anthony J, Parsons Paul J. Field and laboratory studies of resistance to inter rill overland flow on semi-arid hill slopes, southern Arizona [M]//Parsons A J, Abrahams A D. Overland flow. UCL Press, 1992: 1-23.

### 3 结 论

通过对种植草被植物的生长性能、持水能力、土壤水分状况、物理性状、土壤抗蚀性、贮水量、水土保持作用等指标的初步研究,结果表明草被植物较裸地可有效增加植被覆盖度,减少土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤贮水量及保水固土能力,减少了水土的流失。

通过对 9 个试验小区各水保效益指标的观测及综合性状的调查,结果表明:无芒雀麦、苇状羊茅、扁穗冰草、细颈披碱草的水保综合性表现最为优秀,披碱草、新麦草、高冰草表现一般,猫尾草表现较差。其中需要一提的是无芒雀麦:无芒雀麦在各方面的综合表现都较优秀,但是在 120 mm/h 雨强条件下,其表现有些反常。在 120 mm/h 雨强条件下它的产流时间较长,但径流量和径流系数却有明显的增大,侵蚀量也偏高,一种可能是由于实验误差造成的这种反常,这需要进一步的研究更正。另一种可能是其该草被地表所能承受的雨强不能超过一定的范围,这就使得我们在选择这种草时要先调查清楚该地区的气候状况,如果该地区频繁有大到暴雨出现,那么就不适合种植此种草被。当然它所能承受的雨强范围还有待进一步研究确定。由此可见,推广种植草被时要因地制宜,特别是在我国西北地区等水土流失较为严重的地区推广时,更应该测试草种的各种水保指标及综合性

状再予以推广种植,以期为西北地区的水土保持工作做出一定的贡献。

#### 参考文献:

- [1] 王明星. 浅谈水土流失现状及治理措施[J]. 水保与生态, 2006(4): 59-60.
- [2] 郭月峰, 王瑄, 巩琼. 西北地区水土流失现状及防止措施[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 3(27): 153-156.
- [3] 霍亚贞, 李天杰, 等. 土壤地理实验实习[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 3-18.
- [4] 陈震, 吴俊兰. 土壤肥料理化性质简易测定法[M]. 北京: 农业出版社, 1981: 24-27.
- [5] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 58-63.
- [6] 胡祖锬. 土壤肥科学实习指导[M]. 北京: 农业出版社, 1987: 19-45.
- [7] 龙忠富, 唐成斌, 等. 几种草被植物保持水土效益的研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(9): 136-138.
- [8] 林萍, 刘世忠, 苏现平, 等. 山丘区灌木保持水土及综合开发效益的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 12-13.
- [9] 王凭青, 段传人, 王伯初, 等. 杂交狼尾草水土保持能力的实验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 114-116.
- [38] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of ASAE, 1990, 33: 1900-1906.
- [39] Govers Gerard. Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding in loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17: 515-528.
- [40] Abrahams A D, Gang L, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hill slope[J]. Southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 35-47.
- [41] Morris E M, Wooliser D A. Unsteady one-dimensional flow over a plan; partial equilibrium and recession hydrographs[J]. Water Resources. Res., 1980, 16(2): 359-360.
- [42] Govindaraju G M, et al. Approximate analytical solutions for overland flow[J]. Water Resources Research, 1990, 26(2): 2903-2912.
- [43] Franti T G, Foster G R, et al. Modeling the effects of incorporated residue on rill erosion. part I. Model development and sensitivity analysis. Part II. Experimental results and model validation[J]. Trans of the ASAE, 1996, 39(2): 535-550.
- [44] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981, 45: 848-851.
- [45] Ruan H X, Ahuja L R, Green T R, et al. Residue cover and surface-sealing effects on infiltration numerical simulations for field applications[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 853-861.
- [46] Miroslav Kutilek. Time-dependent hydraulic resistance of the soil crust; Henry's law[J]. Journal of Hydrology, 2003, 272: 72-78.
- [47] Morin J, Van Winkel J. Effect of rain drop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1223-1227.
- [48] Foster G R. Modeling the erosion process[M]//Haan C T, eds. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Hoseph, M I, USA, ASAE Monograph, 1982, 5: 297-379.
- [49] Kinnell P I A. The mechanics of raindrop induced flow transport[J]. Aust. J. Soil Res., 1990, 28: 497-516.
- [50] Smart G M. Sediment transport formula for steep channels[J]. J. Hydr. Eng., ASCE, 1984, 110: 267-277.
- [51] Alonso C V, Neibling W H, Foster G R. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1981, 24: 1211-1226.
- [52] 汤立群, 陈国祥. 坡面土壤侵蚀公式的建立及其在流域产沙中的应用[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 104-110.

(上接第 128 页)