

山区小流域坡面和沟道侵蚀的数学模式探讨

程根伟¹, 肖飞鹏², 范继辉^{1*}

(1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2 广西水利电力职业技术学院, 广西 南宁 530023)

摘要: 小流域土壤侵蚀预报和模拟一直是世界土壤侵蚀研究的前沿领域, 其中, 坡面侵蚀和沟道侵蚀的计算方法、侵蚀能力的不均匀问题以及泥沙在塘库河道的沉积问题是研究的关键。对此, 重点从侵蚀机理和计算方法上进行探讨, 提出考虑到坡面土壤抗侵蚀能力和塘库沉积作用的计算方法, 研讨了影响流域侵蚀和泥沙输送的主要环节和关键影响因子, 分析了流域土壤抗蚀能力的空间差异及其对模拟结果的影响, 提出了小流域侵蚀泥沙数学模型的基本结构框架, 为进一步完善现有侵蚀泥沙过程模型提供了新的计算方法。

关键词: 坡面侵蚀, 沟道侵蚀, 流域产沙, 数学模型, 泥沙沉积库

中图分类号: S157

文献标识码: A

地表土壤在降雨和径流冲刷作用下发生的分散和移动称为坡面侵蚀, 被侵蚀搬运的泥沙汇集到沟道河流中, 沿河道向下游移动, 并有一部分沿程沉积下来, 最终到达流域出口的称为流域产沙^[1]。侵蚀与产沙是一个相互关联的流域系统动力过程, 它受到许多自然地理因素的制约, 各个因素之间又存在着错综复杂的相互作用^[2,3]。土壤侵蚀是个全球性问题, 不但使土层变薄, 土壤养分流失, 造成土壤生产力下降, 而且造成水质污染^[4]。侵蚀模型是预报水土流失、指导水土保持措施配置、优化水土资源利用的有效工具, 长期以来受国内外学者的广泛关注^[5]。小流域作为完整的径流形成、汇集和侵蚀、产沙、输沙系统, 是进行水土流失综合治理的基本单元。近50年来小流域土壤侵蚀预报模型研发一直是世界土壤侵蚀研究的前沿领域, 也是水土保持工作者关注的焦点之一^[6]。

美国在1960年代提出一套通用土壤流失方程(USLE), 得到各国的认可和应用^[7,8]。1995年WEPP侵蚀模型正式发表, 包括坡面版和流域版两

个版本^[9,10]。由于WEPP是过程模拟模型, 比过去的侵蚀量计算模型具有明显优越性, 可以估算土壤侵蚀的空间分布及流失量时间的变化。近期国际上以EUROSEM^[11] (欧洲水蚀预报模型)、GeWEPP^[12,13] (基于GIS的流域侵蚀预报模型)、AVSWAT2000^[14] 等为代表, 国内以蔡强国^[15]、谢树楠^[16]、张继生^[17]、罗志军^[18]、万晔^[19]、夏艳华与张平仓^[20] 等学者建立的符合国情的侵蚀模型为代表推出的一批模型, 对于预报流域径流与土壤侵蚀过程, 评价土地利用和农业管理措施对土壤侵蚀的影响提供了可能性。

但现有的侵蚀模型还有许多需要完善的地方, 主要表现为: 1. 坡面模型研究较多, 而流域模型开发, 特别是大中流域研究较少。大部分过程计算模型都是用于模拟简单坡面侵蚀的, 这与模拟全流域的侵蚀模型具有明显的差距。已有的流域土壤侵蚀模型, 又大多是适用小流域的, 如WEPP的流域版只适用于1 km内的田块小流域, LISEM (Limburg Soil Erosion Model)被设计用于1~100 km的流

收稿日期 (Received date): 2009-07-11; 改回日期 (Accepted): 2009-10-12.

基金项目 (Foundation item): 水利部公益性专项 (项目编号: 2007SHZ1-34) 和中科院西部之光项目资助。[Non-profit Industry Financial Program of MWR (2007SHZ1-34); West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences]

作者简介 (Biography): 程根伟, 男 (1956-) 研究员。研究方向: 水文学与水资源, 森林生态。[Cheng Genwei 1956-, male research professor mainly engaged in hydrology and forest ecology]

* 通讯作者 (Author for correspondence): 范继辉 (1980-) 男, 助理研究员。研究方向: 水文水资源。[Fan Jihui (1980-), male assistant researcher mainly engaged in hydrology and Water Resources] E-mail: jhf@imde.ac.cn

域^[2], EPIC 设定的排水最大面积为 100 hm 等, 适合于大中流域的模型较少。2. 在小流域或坡面侵蚀模型中, 主要模拟了坡面及细沟的侵蚀过程, 而对于切沟、冲沟等沟道侵蚀过程的研究相对较少, 这可能与国外土壤侵蚀主要发生在缓坡地有关。3. 水力侵蚀模型研究多, 而重力侵蚀研究很少。4. 模型中产沙部分研究较多, 在泥沙输移和汇集方面的研究较为薄弱, 一般采用水流挟沙力公式或泥沙连续方程进行计算, 也有的基于流域泥沙输移比为 1 的假设, 直接将各单元的产沙量叠加。

因此, 开展不同尺度流域侵蚀产沙和输移之间内在联系的研究, 将坡面和小流域的研究成果应用到大中流域, 建立大尺度区域土壤侵蚀模型, 为大中流域水土保持规划、大江大河泥沙治理提供技术支持, 是土壤侵蚀模型研究的一个重要的方向。开发用于流域侵蚀计算的数学模型主要需要解决几个关键问题, 即坡面侵蚀的计算方法, 沟道侵蚀的计算方法, 侵蚀能力的不均匀问题, 以及泥沙在塘库河道的沉积问题等等。本文对上述存在的几个关键问题进行了理论分析和模式探讨, 以便为进一步建立流域侵蚀系统模型奠定基础。

1 坡面土壤侵蚀的推理公式

关于坡面土壤侵蚀有许多试验资料, 也有一些半经验公式, 如美国水土保持局著名的通用公式 USLE^[7]:

$$N = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中 N 年平均土壤侵蚀量, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 降雨侵蚀度因子, 为降雨强度与降雨量的度量, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 土壤可蚀性因子, 为特定土壤在 22m 长、坡度 9% 的坡地上单位降雨的侵蚀率, $t \cdot h/(m \cdot mm \cdot MJ)$; LS 坡长坡度因子, m ; C 作物(管理)因子, 是作物覆盖地表与露地侵蚀量之比; P 水土保持措施因子。

以及日本土木学会关于天然坡面的侵蚀公式^[23]

$$N = F \cdot R \cdot S^{1.35} \cdot L^{0.35} \cdot P_{30}^{1.75} \quad (2)$$

式中 P_{30} 为最大 30 min 降雨量, mm/h ; F 为侵蚀特征参数, 需要根据土壤结构等条件率定, $t/(m \cdot mm^2 \cdot MJ)$; 其他变量如式(1)。

这些公式有的不适合坡度较大的地面的分析(例如 USLE 公式), 有的缺乏具体的参数或形式不

合理(例如后一公式的坡度指数大于 1.0), 需要研究有关坡面土壤侵蚀的推理公式。

对于降雨产生的坡面漫流, 可以采用紊流的水力学公式描述, 对于坡面单宽流量 $q(m)$ 和坡面糙率 n 水深 $H(m)$ 、坡度 S 的关系如下:

坡面水流的连续性方程为

$$q = \frac{1.49}{n} H^{5/3} S^{0.5} \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dx} + \frac{dq}{dy} = i - f$$

式中 i 为暴雨强度, mm/h ; f 为下渗速率, mm/h ; L 为坡长, m 对于恒定流, $dh/dt=0$ 则上式等价于

$$q = [i - f]^+ \cdot L \quad (4)$$

上面的符号 $[\]^+$ 是克朗内尔取正算子, 即

$$[a]^+ = \begin{cases} a & a \geq 0 \\ 0 & a < 0 \end{cases} \quad (5)$$

坡面流速 $U(m/s)$ 数值上等于坡面单宽流量 q 其值可由前面的两个方程联解可得到

$$U = \left[\frac{1.49}{n} \right]^{0.6} \cdot S^{0.3} \cdot (i - f)^{0.4} \cdot L^{0.4} \quad (6)$$

设土壤抗冲刷流速为 $V_0(m/s)$, 则在流速 U 下的坡面土壤侵蚀强度为

$$N = K \frac{[U - V_0]^+}{V_0} = K \left[\left(\frac{1.49}{n} \right)^{0.6} S^{0.3} \frac{(i - f)^{0.4}}{V_0} L^{0.4} - 1 \right]^+ \quad (7)$$

式中 K 为单位换算系数, N 为单位时间与单位面积上的冲刷深度(即侵蚀强度), m/a 上式是裸土表面侵蚀的推理公式, 它反映了地表侵蚀强度 N 与坡长 L 、坡度 S 、土壤强度 V_0 、表面情况 n 及暴雨强度 i 之间的关系。

若取典型情况下的参数: $n=0.5$ $V_0=0.1 m/s$ $i=10 mm/h$ $f=2 mm/h$ 则可由上式计算得到不同坡长和坡度下的土壤侵蚀强度关系曲线(图 1)。

由图 1 可见, 坡长与侵蚀强度的函数关系为上凸曲线, 曲线起点不过原点, 而是在 2~30m 的范围内变化(与坡度和抗冲刷能力有关), 这个理论关系有一定的代表性。陈明华根据山坡侵蚀试验得到的坡长与地面侵蚀强度的关系, 与我们所得到的推理公式曲线很相似, 他总结出的坡面侵蚀公式为^[23]

$$L_s = (\theta/10)^{0.78} \cdot (L/20)^{0.41} \quad (8)$$

式中 坡长 L 的指数(0.41)与推理公式的指数(0.4)基本相同, 但是其坡度采用的是角度 θ 而不是一般的坡度 S 这里 $\sin \theta = S$ 故两者的指数不可比。

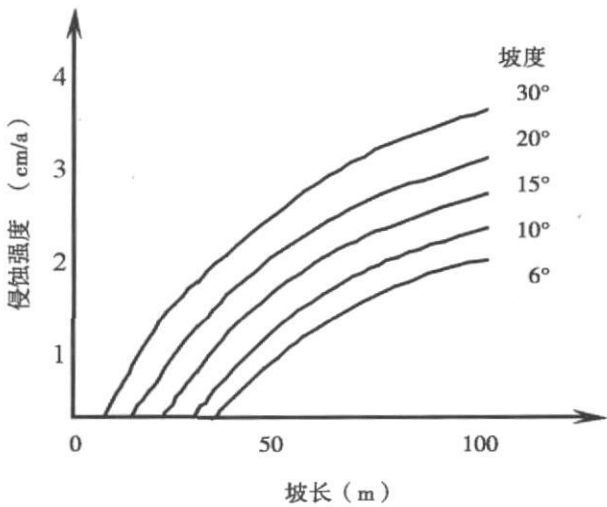


图 1 土壤侵蚀强度与坡度、坡长的关系曲线
Fig 1 Correlation curve between soil erosion intensity and slope length gradient

前面公式中的 N 是指单位面积上的侵蚀强度, 整个坡面的总侵蚀量即坡面土壤流失量 q_s (cm/a), 其计算式为

$$q_s = \int_0^L N dl = K \left[(1.5/n)^{0.6} S^{0.3} \frac{(i-f)^{0.4}}{1.4V_0} L^{1.4} - L \right] \quad (9)$$

2 细沟侵蚀

在坡面侵蚀发生之后, 坡面土壤发生冲刷, 由于天然坡面自然存在高低不平的形态, 水流将向低处汇集, 形成多条比较集中的分股水流, 分股水流更加强了对坡面土壤的冲刷侵蚀力, 因此有集中水流的地方就成为冲刷细沟。

细沟侵蚀产沙能力可采用 Foster 和 Meyer 提出的以下公式进行计算:

$$Dr = \xi r \cdot C_0 \cdot K_0 \cdot \tau^{1.5} \quad (10)$$

式中 Dr 为细沟侵蚀产沙能力, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; ξr 为细沟侵蚀产沙系数, τ 为地表径流剪切力, N/m ; C_0 、 K_0 分别为土壤侵蚀力因子和植被管理因子, 具体取值可采用土壤流失通用方程 (USLE) 中的相应值, 且 $\tau = \gamma h \sin \theta$ 。这里 γ 为水的容重, N/m^3 ; h 为地表径流水深, m ; θ 为坡度, $^\circ$ 。

上述公式计算细沟侵蚀的主要参数是 ξr 它主要取决于土壤抗侵蚀能力和细沟的大小, 但是这个参数的取值很困难, 需要对一个地区坡地的径流侵蚀试验来率定选择。

3 抗侵蚀能力的非均匀性

由于流域中土壤质地和结构的不同, 地面的抗侵蚀能力也是不均匀的, 呈现随空间变化的特点, 这个性质使得采用单一抗侵蚀能力模式计算的结果不合理, 例如在中、小雨的情况下, 如果地面漫流速度低于平均抗侵蚀力, 按均匀模式计算将不会发生侵蚀, 但是可能在一些地方的坡面抗侵蚀能力是低于水流速度的, 实际上还是会形成局部侵蚀, 因此在模型中应该考虑到这种特性。

假设流域的抗侵蚀能力 $S(f)$ ($\text{t} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) 在空间上具有直线分布, 在均匀降雨和地面产流情况下, 地面水流的侵蚀强度 $N(f)$ ($\text{t} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$) 是相同的, 则在 $S(f) < N(f)$ 的地方, 侵蚀就会发生, 而在 $S(f) > N(f)$ 的地方, 不会发生侵蚀, 因此实际侵蚀范围就是 $S(f) = N(f)$ 的交点以下曲线所具有的面积, 实际侵蚀的总量为 $Q_s = N(f) - S(f) \times df$ 的累积数值。各要素之间的关系参见图 2 所示。

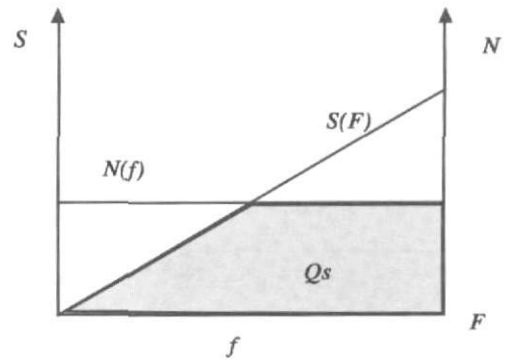


图 2 土壤抗侵蚀能力分布计算模式
Fig 2 Distributed computing model of soils anti-erosion ability

按照图 2 所示的分布式流域侵蚀模式, 首先需要确定流域的抗侵蚀能力分布函数, 即图中的 $S(f)$ 曲线的形式, 在假设为直线分布的情况下, 该分布函数的最大值为流域平均抗侵蚀能力的两倍, 因此比较容易就得到了 $S(f)$ 函数关系为

$$S(f) = 2 \times f/F \quad (11)$$

式中 f 为侵蚀面积, hm^2 ; F 为流域面积, hm^2 。

在模拟计算的时候, 需要根据降雨强度, 计算流域径流量 R (m^3/s)、坡面径流速度 V (m/s), 推算出流域平均的侵蚀强度 N 它可以看成在流域均匀分布的变量, 可由下式计算

$$N(f) = k \times R \times V \quad (12)$$

再根据 $N(f)$ 和 $S(f)$ 的关系, 可计算出流域的侵蚀量 Q_s

4 沟道泥沙沉积与再启动

坡面和细沟侵蚀产生的泥沙随着水流带进下游的沟道, 并可进入流域内的河道、塘堰或者小水库, 在这些地方坡度平缓, 水体扩大, 流速降低, 侵蚀下来的泥沙可能在沟道或塘库中沉积下来, 不再随水流向下输送。这部分沉积的泥沙可能会长期保留在流域内部, 不再参与水流的搬运, 也可能在今后遇到大暴雨山洪时再次启动, 以高含沙水流的方式流出, 一个实用的侵蚀模型应该比较好地模拟这种泥沙沉积和再启动现象。

在一个流域中的沟道塘库结构比较复杂, 逐一地去测量和计算它们的物理参数不太可能, 他们对泥沙沉积起作用的关键参数是它们总的库容大小, 这决定了可容纳的泥沙量和今后可能提供的泥沙物质多少, 因此, 从模拟的方法考虑, 可以将这些沟道和塘库综合成为一个单一的泥沙库, 用它库容来模拟泥沙的沉积和再启动过程 (图 3)。

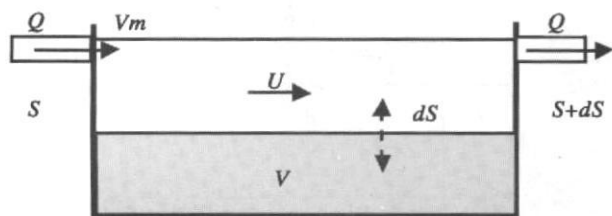


图 3 河道塘库泥沙沉积模式

Fig 3 Sediment deposition model of channel and reservoir

泥沙沉积调节库的状态可以由泥沙沉积量 V (m^3)、库内流速 U (m^3/s) 来表示, 影响泥沙沉积过程的还有最大泥沙库容 V_m (m^3)、泥沙沉积流速 U_a (m^3/s) 和泥沙再启动流速 U_b (m^3/s)。当库内水流速度 U 低于 U_a 之时, 泥沙发生沉积, 而当 U 高于 U_b 时, 沉积的泥沙发生再启动并输移到流域出口。

在模拟计算中, 库内流速 U 需要通过流量 Q 来计算, 一般可以建立如下关于流量和流速的线性关系

$$U = k \times Q \quad (13)$$

当沟道和塘库发生淤积时, 水体中的泥沙沉积量 dS (m^3) 与调节库容 $(V_m - V)$ 和流速差 $(U_a - U)$ 成正

比

$$dS/V = (V_m - V) \times (U_a - U) / (V_m \times U_a) \quad (14)$$

经过沉积之后, 径流中的泥沙将减少到 $(V - dS)$, 而调节库中的沉积泥沙增加到 $(V + dS)$, 而当沟道和塘库发生冲刷时, 启动的泥沙量与流速差成正比, 与库内沉积的泥沙总量也成正比

$$dS = V \times (U - U_b) / U_b \quad (15)$$

经过冲刷之后, 径流中的泥沙增加 dS 而调节库中的沉积泥沙减少到 $(V - dS)$ 。

在一个计算阶段完成之后, 对水流和调节库中的泥沙进行更新, 就可完成对流域中塘库的沉积计算。这个过程需要连续地递推计算, 即可完成流域侵蚀输沙过程。

5 小流域侵蚀数学模型结构

以上对于计算侵蚀的几个关键环节进行了分析, 流域侵蚀模型可以集成这些功能模块, 并加上输入和输出辅助单元, 构成一个完整的推理系统。该模型包括坡面产流、坡面侵蚀、细沟侵蚀、空间分布和塘库沉积等单元, 并结合流域地形、植被和土壤等参数模块, 按照时间递推和先产流后侵蚀、先坡面后沟道的计算程式。参见图 4。

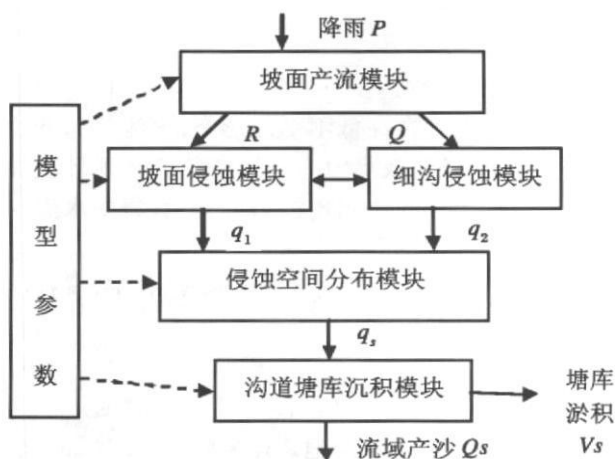


Fig 4 Framework of small watershed erosion calculating

流域侵蚀模型可以在现有的流域降雨径流数学模型的基础上发展出来, 例如现有的分布式水文模型就具有比较好的结构体系, 可以在其中的坡面产汇流的模块中增加坡地土壤侵蚀的结构, 并在河道汇流演算的模块中嵌入沟道沉积计算的模块。对于

依托于 RS GIS平台的分布式水文模型, 还可以非常容易地解决地表不同类型植被覆盖下的坡面侵蚀计算问题, 开发出具有地表自然要素处理功能的降雨—径流—侵蚀—产沙的一体化模型体系, 适用于流域水资源管理和泥沙调控。

6 小结

目前坡面(或地块)与小流域侵蚀研究主要集中在人工坡面和径流小区尺度侵蚀量的监测, 区域(流域)尺度侵蚀量多以河流泥沙观测数据为准, 缺少对自然坡面、小流域和更大尺度水土流失的直接监测, 而用径流小区的资料在向大尺度推广中出现很多问题, 也就是所谓的流域“尺度效应”。影响侵蚀产沙过程的因素在时空上具有很大的不均匀性和变异性, 增加了流域侵蚀产沙模拟的复杂性。

小流域侵蚀泥沙模拟除了要关注坡面土壤侵蚀机制外, 沟蚀作用和塘库淤积不可忽视, 这方面的数学模型比较少, 完善的水动力学模拟也比较困难, 可以采用概化的数学模式来计算, 即使是简化的模式也比完全不考虑这部分的影响要好。研究还发现, 流域内的土壤和植被具有很大的分异性, 坡面抗侵蚀能力具有很大的空间差异, 需要在计算中加以考虑, 本文对这些关键环节的计算提出了数学模式, 在此基础上小流域侵蚀泥沙分布式数学模型正在研发中, 相关工作还有待更深入的工作, 特别是各个模块的参数还需要做大量的实验对比工作。

参考文献(References)

- [1] Tian Lei, Dai Jing, Qi Yonggang. Comment on model of erosion and sediment production in watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(4): 77~79 [田磊, 戴静, 祁永刚. 流域侵蚀产沙模型述评[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(4): 77~79]
- [2] Shi Peijun, Liu Baiyuan, Zhang Keli. Soil erosion process and model studies[J]. *Resources Science*, 1999, 21(5): 9~18 [史培军, 刘宝元, 张科利. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. *资源科学*, 1999, 21(5): 9~18]
- [3] Cai Qiangguo, Liu Jigen. Evolution of soil erosion models in China[J]. *Progress In Geography*, 2003, 22(3): 242~250 [蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(3): 242~250]
- [4] Jain SK, Kumar S, Varghese J. Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique[J]. *Water Resources Management*, 2001, 15: 41~54
- [5] Zhang Guanghui. Research situation and prospect of the soil erosion model[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 389~396 [张光辉. 土壤侵蚀模型研究现状与展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 389~396]
- [6] Jia Yuanyuan, Zheng Fenli, Yang Qinke. Distributed water erosion prediction model for small watershed in loess plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 328~332 [贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 328~332]
- [7] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm planning[J]. In: *Trans. 7th International Cong. Soil Sci.* C]. 1960, 1: 418~425
- [8] Foster G R, Meyer L D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics[J]. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. Proceedings of the Sediment-Yield Workshop* C]. Oxford: USDA Sedimentation Laboratory, Nov 28~30, 1972. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, ARS-S-40, 1975, 190~207
- [9] Nearing M A, Foster G R, Lane L J et al. A process-based soil erosion model for USDA—Water Erosion Prediction Project Technology[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32: 1587~1593
- [10] Laflen J M, Leonard J, Foster G R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology[J]. *J. of Soil And Water Cons.*, 1991, 46(1): 34~38
- [11] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and User Guide[M]. Silsoe College, Cranfield University, 1998
- [12] Renschler C S. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 1005~1017
- [13] Renschler C S, Flanagan D C, Engel B A et al. GeoWEPP—The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project[J]. ASAE meeting paper, No. 022171, St. Joseph, Michigan, 2002
- [14] Di Luzio, Srinivasan M R, Arnold J G, Neitsch S L. ArcView Interface For SWAT2000 User's Guide[M]. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2002
- [15] Cai Qiangguo, Shiu-hung Luk, Wang Guijing. Process-based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the hilly loess region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(2): 108~117 [蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. *地理学报*, 1996, 51(2): 108~117]
- [16] Xie Shunan, Wang menglou, Zhang Ren. Research of Sediment Model for Rainstorm in Gullied-hilly Loess Areas of the Middle Reaches of Huanghe River[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990 [谢树楠, 王孟楼, 张仁. 黄河中游黄土沟壑区暴雨产沙模型的研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990]
- [17] Zhang Jisheng. Mathematical model on sediment yield of middle/small watershed at the area of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2004, 23(4): 117~120 [张继生. 三峡库区中小流域产沙数学模型[J]. *重庆交通学院学报*, 2004, 23(4): 117~120]
- [18] Luo Zhijun, Liu Yaolin, Jia Zeli. Study on estimation of the amount of soil erosion in small watershed based on GIS and RS[J].

- Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2005, 39(2): 269~276[罗志军, 刘耀林, 贾泽露. 基于 RS和GIS的小流域土壤侵蚀量估算研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2005, 39(2): 269~276]
- [19] Wan Ye, Duan Changqun, Wang Yuchao et al. Numerical model and quantitative analysis of soil and water erosion process in the small watershed based on 3S technology[J]. Advances In Water Science, 2004, 15(5): 650~654[万晔, 段昌群, 王玉朝, 等. 基于3S技术的小流域水土流失过程数值模拟与定量研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 650~654]
- [20] Xia Yanhua, Zhang Pingcang. Study on watershed soil erosion models based on erosion mechanics-taking Yangtze Rive Three Gorges Reservoir Area as an Example[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 152~154[夏艳华, 张平仓. 基于侵蚀力学机制的流域土壤侵蚀模型研究——以长江三峡库区王家桥流域为例[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 152~154]
- [21] De Roo A P J, Wesseling C G, Ritsma C J L. ISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I. Theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107~1117]
- [22] Zhang Keli, Peng Wenying, Zhang Zhumei. Review of soil erosion and conservation in Japan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 61~64[张科利, 彭文英, 张竹梅. 日本近年来土壤侵蚀及水土保持研究评述[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 61~64]
- [23] Chen Minghua, Huang Yanhe. Effect of slope gradient and slope length on soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(1): 31~36[陈明华, 黄炎华. 坡度与坡长对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 31~36]

Exploration in Mathematic Models on the Slope and Stria Erosions for Small Watershed in Mountainous Region

CHENG Gerwei¹, XIAO Feipeng², FAN Jihui¹

(1. Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(2. Hydropower Technique College of Guangxi Province, Nan-ning 530023, China)

Abstract: Small watershed soil erosion forecasting and simulation are the world's front fields of soil erosion science. The calculating method of Slope erosion and channel erosion, the non-uniform erosion and sedimentation deposition in the river and reservoir are the key issues in the research. Based on the studies to the erosion mechanics of slope and stria, the basic problems and computation methods are discussed on the erosion simulation. Some new modes in computation of the slope erosion and channel deposition are derived. The key links and impact factors to watershed erosion and sediment transportation are analyzed. A fundamental structure of mathematic model to watershed erosion has been proposed to consider the soils' anti-erosion capacity and its spatial difference. These works will benefit the design of the process-oriented model and improve the result of simulation.

Key words: slope erosion; channel deposition; watershed sediment yield; mathematic model; sedimentation pool