

泥沙搬运能力方程的比较分析

肖培青^{1, 2}, 姚文艺^{1, 3}

(1. 中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 黄委会水土保持局, 河南 郑州 450003; 3. 黄委会水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要: 泥沙搬运是小流域土壤侵蚀、搬运和沉积过程中一个很要子过程, 搬运能力的定量研究是刻画土壤侵蚀过程和建立物理过程侵蚀模型的理论基础。对于目前被广泛采用的坡面漫流输移方程和沟道挟沙水流方程的试验条件进行了比较分析, 探讨了其在黄土高原地区侵蚀模拟过程中的应用可能性和局限性。同时, 表述了在黄土高原地区选择搬运能力方程需要考虑修正条件的必要性。

关键词: 泥沙搬运; 侵蚀过程; 黄土高原

中图分类号: S157. 1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)04-0006-03

Comparison and Analysis of Sediment Transportation Equations

XIAO Pei-qing^{1, 2}, YAO Wen-yi^{1, 3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Soil and Water Conservation Department of Yellow River Conservancy, Commission, Zhengzhou 450003, China;

3. Hydraulic Research Institute of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Sediment transportation is an important sub-process of soil erosion-transport-deposition process in a small watershed. Quantitative analysis on sediment transport is a strong basis for depicting soil erosion process and constructing process-based soil erosion model. Comparison of widely used sediment transportation of overland flow and channel flow has been done. The suitability and limitation of equation application in soil erosion process on the Loess Plateau was discussed. For applying sediment transportation equation on the Loess Plateau the parameter modification is very necessary.

Key words: sediment transportation; soil erosion process; the Loess Plateau

小流域泥沙搬运过程长期以来一直受到众多学者的关注, 目前搬运方程大都基于径流槽试验建立, 主要考虑水流速度、流量、能量坡度、颗粒性质以及水动力条件。Horton (1945)^[1]最早把坡面流侵蚀作用与水流切应力联系起来进行了分析。随后一系列研究表明^[3, 4], 不同水流类型输沙特征一般包括泥沙的性质、分离作用及规律、泥沙运动形式、径流水动力和径流剪切力等。Beshta (1987)^[2]指出由于每个方程的建立都局限于一定试验条件, 在田间实际应用中不同方程的模拟结果差别很大, 因此运用室内试验推出的方程必须慎重考虑其具体水流特征。一些学者利用试验测试了不同的泥沙搬运方程模拟效果, 其结果各不相同。Govers (1992)的水槽试验结果表明^[5], Low 方程模拟效果最好。Low (1989)在他的水槽试验中检验了几个搬运方程, 发现 Einstein-Brown 方程效果最好^[6]。Alonso 等^[7](1981)也测试了几个沟道流方程在凹形坡上坡面漫流中的应用性, 发现 Yalin 公式比较适用于坡面漫流条件, 对于沟道流建议运用 Yang 方程(粗沙颗粒)、Laursen 方程(细沙颗粒)。Julien 和 Simons (1985)^[8]也评述了一些以推移质为主的沟道流方程在坡面漫流中的应用, 认为 Engelund-Hansen (1986)

方程与坡面漫流紧密相关。Guy 等 (1992)^[9]利用水槽试验装置和泥沙搅拌机不断注入泥沙的办法, 检验了 6 个河流搬运方程在坡面漫流中的应用, 结果表明, 沟道流泥沙搬运方程通常不适用于坡面漫流的条件, 尤其是受到雨滴击溅作用的坡面水流结果有明显差异。Prosser 和 Rustonji (2000)^[10]也总结了多数方程应用范围, 认为只有流量和坡度是最基本的影响因子, 水流剪切力和径流水动力都是从这些基本影响因子中推出来的。国内一些学者对输移能力的研究多集中在明渠含沙水流研究, 最近对坡面输移能力研究有所发展^[11, 12]。由于每个方程的应用有一定局限范围, 在坡度陡峭和高含沙水流的黄土高原极端条件下, 不同搬运方程的正确匹配具有十分重要意义。为此, 本文探讨了一些搬运能力方程的应用性, 以期对小流域侵蚀过程定量研究和侵蚀产沙模型的建立提供理论基础。

1 坡面漫流输移能力方程

目前 EUROSEM 和 LISEM 侵蚀模型均采用 Govers (1990) 方程^[13]。Govers 利用泥沙颗粒中数直径从 58 μm 的细颗粒到 1 098 μm 的粗沙颗粒进行了大量的水槽试验, 水

* 收稿日期: 2005-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(502390801, 40335050); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家实验室基金(10501-122)

作者简介: 肖培青(1972-), 女, 河南卫辉人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程模拟的研究。

槽坡度从 1~ 12°, 单宽流量从 2~ 100 cm³/s, 长度设计 6 m 以保证泥沙搬运能力的实现。他根据试验结果比较了泥沙搬运能力和水流剪切力以及水动力的关系, 建立了一个泥沙搬运能力和单位径流水动力的经验方程, 方程对模拟细泥沙颗粒具有很好的结果。试验观测到的水流最大泥沙含沙量是 1 200 g/L (Govers, 1992a), 方程最适合的坡度条件是 1~ 8°, 因此 Gover 方程的建立是一个基于缓坡条件下预测搬运能力的方程。

$$TC_f = c \cdot (S \cdot u - S \cdot u_{cr})^d \cdot \rho_s^{-0.6}$$

其中: $c = (\frac{d_{50} + 5}{0.32})^{-0.6}$ $d = (\frac{d_{50} + 5}{300})^{0.25}$

式中: TC_f ——泥沙搬运能力 (g/L); S ——坡度的正弦; u ——水流平均速度 (cm/s); $S \cdot u_{cr}$ ——临界水动力 (0.4 cm/s); ρ_s ——泥沙颗粒密度 (kg/m³); d_{50} ——颗粒中数粒径 (m)。

Everaert (1991)^[13]测试了层流机制为主的细沟间泥沙搬运能力。水槽长度 3 m, 宽度 0.05 m, 坡度从 1~ 10°, 单宽流量范围为 0.2~ 2.5 cm²/s, 最小土壤粒径 33 μm, 运用径流水动力和剪切力获得了理想结果。单位水动力方程如下:

$$\log(q_s) = -1.31 + 1.51 \log(S \cdot V)$$

式中: q_s ——泥沙搬运率 (kg/m²·s); V ——水流速度 (cm/s)。

Huang (1995)^[4]利用直径 1.2 m 和坡度变化于 4%~ 30% 的土盘研究了土壤流失, 发现泥沙含量可用一个基于水动力的多项式进行模拟。

$$C = D_1 \cdot q^2 \cdot S^2 + D_2 \cdot q \cdot S + D_3$$

式中: C ——泥沙含量 (g/l); q ——单位宽度流量 (m²/s); D_1 、 D_2 、 D_3 ——与土壤性质紧密相关的系数。

Prosser 和 Rustomji (2000)^[11]认为流量 q 与坡度 S 是决定泥沙搬运的主导因子, 泥沙水动力和剪切力由这两个基本参数推测。因此他们认为多数方程与流量 q 和坡度 S 紧密相关。运用不同计算方法对系数 a 和 b 进行比较, 发现 a 和 b 系数依计算方法和空间尺度的不同而变化。水槽试验结果表明 a 和 b 变化范围介于 1.0~ 1.8, 其中间值是 1.4。方程的应用可以根据具体条件而进行调整。

$$TC = A \cdot q^a \cdot S^b$$

式中: TC ——清水泥沙搬运力 (g/L)

Abrahams 等 (2001)^[14]运用大量水槽试验资料建立了一个适合细沟间的泥沙搬运方程。水槽长 5.2 m, 考虑的泥沙特性和水力学参数包括水深、流速、雷诺数、弗罗德数、坡度、泥沙粒径、泥沙含量、糙度系数、水流密度和黏滞度等。该方程的模拟尤其适合于泥沙体积含量 0.3、最小粒径 98 μm、最大坡度 10° 的条件, 这种条件与黄土高原地区情况比较接近。

$$q_b = a \cdot D \cdot U_* \cdot Y \cdot (1 - \frac{Y_c}{Y})^b \cdot (\frac{V}{U_*})^c \cdot (\frac{w_i}{U_*})^d$$

$$w_i = (\frac{g \cdot (\rho_f - \rho_s) \cdot D}{\rho_f})^{0.5}$$

式中: q_b ——单位宽度泥沙搬运体积含量 (m²/s); U_* ——剪切力速度 (m/s); Y ——剪切力系数; Y_c ——临界剪切力系数 (0.6); ρ_s ——液体密度 (kg/m³); ρ_f ——固体密度 (kg/m³); a ~ d ——系数。

迄今为止, 适合在黄土高原地区进行模拟的坡面漫流方程并不多。Govers 方程已在黄土高原地区大南沟流域进行了土壤侵蚀模拟^[15], 研究结果表明, 该方程对高强度暴雨输移能力的估测精度较高, 但对小降雨事件来说, 方程会低估地表径流的搬运能力。其原因在于重力作用对坡地上泥沙的搬运能力有重要影响。而 Everaert 和 Huang 建立的方程

还没有在黄土高原田间大尺度进行模拟, 是否能够达到泥沙搬运能力尚待检验。Abrahams 方程的应用条件相对于其它方程比较适合于黄土高原, 但该方程模拟的粒径尺寸偏大且坡度较缓, 要将其应用于黄土高原仍需进行适当校正。

2 沟道挟沙水流方程

Yalin (1963)^[16]方程是一个以模拟推移质为主的沟道流方程, 修正的 Yalin 方程已用在 CREAMS 和 WEPP 土壤侵蚀模型以及其它一些模型中, 具有广泛的应用前景 (Singh, 1997)。Yalin 方程基于河床空间分布的悬移质分析而获得, 并假定动床具有相同尺寸大小的无粘性颗粒和均匀水流条件。方程中的参数意义同以上前述方程。

$$q_s = (\rho_s - \rho_f) \cdot D_{50} \cdot U_* \cdot P$$

其中: $P = 0.635 \cdot (\frac{Y}{Y_c} - 1) \cdot (1 - \frac{\ln(1 + as)}{as})$

$$as = \frac{2.45}{S^{0.4}} \cdot \sqrt{V_*} \cdot (\frac{Y}{Y_c} - 1)$$

Yang (1973)^[17]是目前应用最多的适合于悬移质和推移质的沟道流方程之一。Yang 方程的建立是基于中数粒径在 60~ 2 000 μm 的无黏性自然沙, 其颗粒比重为 2.65, 形状系数 0.7。假定泥沙搬运发生在一个平衡状态的冲积河流中, 坡度非常缓, 可忽略下游的重力作用。Yang 方程是基于径流水动力建立的无单位方程, 同时考虑了由泥沙含量决定的沉降速度和水动力黏滞度的影响。

$$\log C_p = I + J \log(\frac{V \cdot S}{\omega} - \frac{V_{cr} \cdot S}{\omega})$$

$$I = 5.435 - 0.286 \log(\frac{\omega \cdot D_{50}}{v}) - 0.457 \log(\frac{U_*}{\omega})$$

其中

$$J = 1.799 - 0.409 \log(\frac{\omega \cdot D_{50}}{v}) - 0.314 \log(\frac{U_*}{\omega})$$

式中: C_p ——泥沙含量 (mg/kg); ω ——泥沙沉降速度 (m/s); v ——动力黏滞度: (m²/s)

Bagnold (1980)^[18]应用水槽和河流的实际资料建立了一个以推移质为主的沟道流方程。尽管方程在水深、颗粒尺寸和水动力等方面涉及到较大范围, 但最小粒径仍为 0.3 mm。如河床泥沙非常均匀, 可用中数直径 (D_{50}) 代替泥沙粒径。由方程可以看出, 泥沙搬运能力随径流深增加而降低, 这是因为河床推移质仅发生在接近床底的一层。悬浮沙与河流的深度紧密相关, 因此方程很可能会低估悬浮沙的搬运能力。

$$q_s = q_s^* \cdot (\frac{\Omega - \Omega_{cr}}{\Omega - \Omega_{cr}^*})^{3/2} \cdot (\frac{h}{h_*})^{-2/3} \cdot (\frac{D}{D_*})^{-1/2}$$

式中: q_s^* ——泥沙基准搬运率 (0.1 kg/m²·s); Ω ——单位面积径流水动力 (kg/s³); R ——水力半径 (m); Ω_{cr} ——单位面积临界水动力 (0.5 kg/s³); h_* ——相对水深 (0.1 m); D_* ——颗粒基准直径 (0.0011 m)。

Low (1989)^[6]选用 6 m 长的水槽进行试验建立了泥沙搬运方程, 试验选用直径 3.5 mm 的圆柱形颗粒, 坡度范围在 4.6~ 14.9 × 10⁻³ (0.3~ 0.9°), 最大单位流量在 4.5~ 30 L/s 之间。Govers (1992) 对一系列方程进行了测试, 发现 Low 公式计算结果比较理想。

$$q_b = \frac{6.42}{(s-1)^{0.05}} \cdot (Y - Y_{cr}) \cdot D_{50} \cdot V \cdot S^{0.6}$$

式中: q_b ——单位宽度泥沙搬运体积含量 (m²/s); s ——固体和液体比重比率。

Rickenmann 的水槽试验坡度从 7%~ 20%, 水流含沙量

高达 $1\,360\text{ kg/m}^3$, 并考虑了水流密度对悬移质搬运的影响。Rickenmann (1991)^[19] 方程适用于沟道高含沙水流且坡度达到 20% 的情况。Borges 等 (1995) 在法国 Alps 地区的一个泥沙含量高达 500 g/L 的小流域进行试验, 研究了包括 Rickenmann 方程在内的几个泥沙搬运能力方程的适用性。从理论上讲 Rickenmann 方程最适合, 但与实测数据相比并没有达到预期的理想结果。高含沙水流泥沙下沉速度比清水要小, 因而流体的性质改变对泥沙搬运有重要影响。

$$q_b = \frac{6.42}{(s-1)^{1.6}} \cdot \left(\frac{D_{90}}{D_{30}}\right)^{0.2} \cdot (q - q_{cr}) \cdot S^2$$

其中 $q_{cr} = 0.065 \cdot (s-1)^{1.67} \cdot g^{0.5} \cdot D_{50}^{1.5} \cdot S^{-1.12}$
式中: D_{90} ——90% 的泥沙颗粒直径分布 (m); D_{30} ——30% 的泥沙颗粒直径分布 (m)。

根据 Hessel R. 的模拟结果^[15], 对于细沙粒径组成较细且坡度陡峭的黄土高原丘陵沟壑区, 由于大部分模拟结果表明泥沙搬运能力对坡度非常敏感 (Schoklitsch, Yalin, Bagnold, Low), 运用沟道挟沙水流方程时泥沙搬运能力临界值可以被忽略。如果考虑用一个单一方程进行小流域侵蚀模拟, 多数方程模拟结果在陡坡与流域出口的泥沙含量相比偏大, 在缓坡会偏小。其中, Yang 方程对颗粒尺寸的变化非常参考文献:

敏感, 适合于坡面漫流的 Govers 方程在曼宁糙率系数进行修正后, 模拟结果比较理想。

3 讨 论

(1) 坡面漫流输移和沟道挟沙水流推移过程是小流域泥沙搬运过程的主要形式, 不同的搬运能力方程建立有其试验条件局限性。基于此, 本文详细介绍了目前广泛应用的坡面漫流输移和沟道挟沙水流方程的应用范围。

(2) 现有搬运方程大多基于缓坡条件而建立, 已有黄土高原典型小流域侵蚀模拟结果表明多数方程的泥沙搬运能力对坡度或颗粒尺寸变化非常敏感。目前, 修正的 Govers 方程是模拟小流域整个搬运过程的比较理想方程。

(3) Abrahams 方程是目前考虑适用条件最为齐全的方程。该方程模拟条件尽管相对于黄土高原颗粒直径偏大、坡度较缓, 但方程适用条件与黄土高原的特速性质比较接近。

(4) 黄土高原地区的高含沙水流和地形陡峭特征已经改变了流体的黏滞度、阻力和搬运能力, 对径流速度和流体性质有很重要的影响。因此, 根据不同方程的具体适用条件在黄土高原地区进行修正和完善十分必要。

- [1] Horton, R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1945, 56: 275- 370.
- [2] Bagnold, R A. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers[C]. Proceedings of the Royal Society of London, 1980. 453- 473.
- [3] Everaert, W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 513- 532.
- [4] Huang, C. Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59: 982- 990.
- [5] Govers, G. Relationships between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17: 515- 528.
- [6] Low, H S. effect of sediment density on bedload transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989: 124- 138.
- [7] Alonso, C V, W H Neibling, G R Foster. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24: 1211- 1220.
- [8] Julien, P Y, D B. Simons Sediment transport capacity of overland flow[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28: 755- 762.
- [9] Guy, B T, Dickinson W T, Rudra R P. Evaluation of fluvial sediment transport equations for overland flow[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35: 545- 555.
- [10] Prosser, I P, Rustomji P. Sediment transport capacity relations for overland flow[J]. Progress in Physical Geography, 2000, 24: 179- 193.
- [11] 吴长文, 陈法扬. 坡面土壤侵蚀及其模型研究综述[J]. 南昌水专学报, 1994, 13(2): 1- 11.
- [12] 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, 13(2): 1- 11.
- [13] Govers, G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[J]. IAHS publication, 1990: 45- 63.
- [14] Abrahams, A D, Li G, Krishnan C, et al. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26: 1443- 1459.
- [15] Rudi Hessel. Modeling soil erosion in a small catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. Tekst. Proefschrift Universiteit Utrecht, 2002: 303- 304.
- [16] Yalin, M S. An expression for bedload transportation[J]. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1963: 221- 250.
- [17] Yang C T. Incipient motion and sediment transport[J]. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1973, 99: 1679- 1703.
- [18] Bagnold, R A. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers[C]. Proceedings of the Royal Society of London, 1980. 453- 473.
- [19] Rickenmann, D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991: 1419- 1439.