

径流功率理论在黄土坡面侵蚀 产沙计算中的应用*

崔文滨^{1a}, 李 鹏^{1b, 2}, 李占斌², 茹华南³

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院; b 林学院, 陕西 杨凌 712100;

2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

3 河南省义马煤业集团 农林分公司, 河南 义马 472300)

[摘 要] 介绍了径流侵蚀产沙功率理论的基本原理, 并应用这一理论对放水冲刷试验中不同坡度和流量条件下的侵蚀产沙特征进行了分析和比较。结果表明, 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。

[关键词] 径流功率; 坡面侵蚀; 产沙计算

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)09-0103-05

众所周知, 坡面土壤侵蚀产沙是由于坡面径流在向下流动的过程中, 径流冲刷作用和坡面抗蚀作用以及与地面物质补充能力之间相互协调的结果。经典水力学将坡面侵蚀划分为土壤颗粒剥离、输移和沉积 3 个相互影响、相互制约、相互联系的过程, 并对径流水动力学参数及细沟发生机制进行了探讨, 取得了丰富的研究成果^[1~4], 尤其是滚波现象及其叠加现象的发现^[5~8], 进一步深入揭示了细沟发生发展的机理。但是由于影响侵蚀产沙因素变化的随机性较大, 简单的关系不能反映侵蚀过程中各种因素的内在联系等原因, 致使土壤侵蚀过程研究中有许多理论和实践问题目前难以取得突破性进展。因此研究人员^[9]尝试采用径流能耗理论对侵蚀产沙过程进行了模拟和分析, 也取得了良好效果和新的进展, 为土壤侵蚀研究开拓了新的思路和途径。

从物理学角度讲, 坡面径流对土壤的侵蚀过程是一个做功消耗能量的过程, 具有一定的功率。Yang C T^[10]审查了常规泥沙输送方程推导中所用的基本假设, 认为由流量、平均速度、能坡或剪切力确定输沙率的假定不尽合理, 因此由这些假定所得结果的普遍性和可用性也值得怀疑。为了进一步深入探讨坡面径流侵蚀产沙机理, 在前人研究的基础

上, 本研究尝试利用单位径流功率理论对陡坡条件下的径流侵蚀产沙特征进行分析和模拟, 并与试验实测数据进行了比较, 对应用径流功率理论进行坡面侵蚀产沙计算的可行性进行探讨, 以期建立基于单位径流功率理论的坡面土壤侵蚀计算新方法。

1 理论基础

基于对坡面径流做功消耗能量过程的理解, Yang C T^[10]提出径流功率理论, 将单位径流功率定义为流速和坡降的乘积。单位重量径流在输送泥沙时所做的功与单位重量水体所具备的功率直接相关, 因此径流含沙量或泥沙输送量必然与单位径流功率直接相关。在长度为 x , 总落差为 Y 的一条明渠上, 单位径流所具备的用于输送水和泥沙的能量率为:

$$\frac{dY}{dt} = \left[\frac{dY}{dx} \frac{dx}{dt} \right] = VS \quad (1)$$

式中, t 为时间; VS 为单位径流功率(P)。

为了确定总含沙量, 杨志达^[11]进一步提出了包括有关变量的函数关系, 即:

$$\Psi(C_s, VS, U^*, v, \omega, d) = 0 \quad (2)$$

* [收稿日期] 2004-12-29

[基金项目] 国家自然科学基金项目“坡面侵蚀输沙动力过程实验研究”(40371075)

[作者简介] 崔文滨(1979-), 男, 山东滨州人, 在读硕士, 主要从事森林生态与水土保持研究。

式中, C_t 为不包括冲泻质的总含沙量($\mu\text{g/L}$); U_* 为摩阻流速; ν 为运动粘滞系数(cm^2/g); ω 为泥沙沉速(m/s); d 为平均颗粒粒径(mm)。式中的 C_t 可用以下无量纲形式表示:

$$C_t = \phi \left(\frac{VS}{\omega}, \frac{U_*}{\omega}, \frac{\omega d}{\nu} \right) \quad (3)$$

通过对试验室水槽资料的分析, 杨志达^[10]发现(2)式的最佳形式为:

$$\log C_t = I + J \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cs}}{\omega} \right) \quad (4)$$

式中, 参数 I 和 J 反映了水和泥沙的特性; V_{cr} 为初始临界单位径流功率(P); $\bar{\omega}$ 为平均泥沙沉速(m/s)。通过对水槽试验的分析可以得到:

$$I = a_1 + a_2 \log \frac{\bar{\omega} d}{\nu} + a_3 \log \frac{U_*}{\bar{\omega}} \quad (5)$$

$$J = b_1 + b_2 \log \frac{\bar{\omega} d}{\nu} + b_3 \log \frac{U_*}{\bar{\omega}} \quad (6)$$

式中, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 均为系数。杨志达^[11]通过对 463 组试验室资料的多变量回归分析, 确定了上述各系数的值。把各系数值代入式(4)可以得到下式:

$$\log C_s = 5.435 - 0.286 \log \frac{\bar{\omega} d}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\bar{\omega}} + \left[1.799 - 0.409 \log \frac{\bar{\omega} d}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\bar{\omega}} \right] \log \left(\frac{VS}{\bar{\omega}} - \frac{V_{cs}}{\bar{\omega}} \right) \quad (7)$$

式中, 其他参数的计算方法如下:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{18} \frac{Y_s - Y}{Y} g \frac{d^2}{\nu} \quad (8)$$

$$U_* = \frac{0.01775}{(1 + 0.0337t + 0.000221t^2)} \quad (9)$$

$$U_* = (ghJ)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

上述公式中, C_s 为总含沙量($\mu\text{g/L}$); t 为水温($^{\circ}\text{C}$); Y_s 为泥沙密度(kg/m^3); Y 为水流密度(kg/cm^3); g 为重力加速度; h 为水深(cm); J 为能坡。

在利用上式计算出单宽径流总含沙量 C_s 后, 可

以利用下式计算单宽侵蚀率:

$$\frac{W}{B} = \frac{YQ}{B} C_s \quad (11)$$

式中, W 为侵蚀量(g); B 为平均径流宽(cm); Q 为径流流量(L/min)。

单位径流功率公式最初应用于明渠流, 其初始运动要求的无量纲临界单位径流功率, 是否直接用于水深较浅的坡面流和细沟流, 还有待于进一步验证。1986 年, Moor 和 Burch^[12] 尝试直接应用单位径流功率公式进行坡面和细沟侵蚀率的计算, 结果发现当土壤颗粒为分散状时, 这一方法能够相当精确地预测坡面流和细沟流的输沙率。

2 试验设计

本试验在可调坡度的钢制土槽上进行, 土槽长 4 m, 宽 0.33 m, 深 0.5 m。根据黄土高原暴雨发生频率在野外标准径流小区上产生的径流量, 换算得到土槽上的放水流量分别为 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 和 6.5 L/min。坡度采用 3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 18°, 21°, 24°, 27° 和 30° 共 10 级变化。供试土壤为陕西杨凌当地塬土, 采用分层填充夯实的方法在土槽内进行填土, 保持土槽内的土壤上下均匀, 并且将土壤容重控制在 1.25 g/cm³ 左右, 试验前在土槽上洒水使土壤表层水达到饱和。试验土槽划分为 4 个断面, 试验过程中用颜料示踪法测量每个断面上每分钟内的径流流速; 在土槽纵向等距离确定 12 个点, 每分钟分别在这些点上用直尺测量水宽; 在土槽出水口处, 每 1 min 内接取一定体积的径流泥沙样, 烘干并测定其含沙量; 接取全部径流泥沙样以计算径流体积和侵蚀产沙量。为了保证试验的一致性, 相同坡度和相同流量的冲刷试验进行 2 个重复, 取其平均值作为该试验条件下的径流侵蚀产沙量, 对于试验误差较大的冲刷场次, 则需要重新进行试验。试验土壤粒径组成如表 1 所示。

表 1 试验土壤的粒径组成

Table 1 Grain composition of experiment soil

粒径/mm Grain size	百分比/% Percentage	粒径/mm Grain size	百分比/% Percentage	粒径/mm Grain size	百分比/% Percentage
1~0.25	0.12	0.05~0.01	41.13	0.005~0.001	12.89
0.25~0.05	2.7	0.01~0.005	6.88	<0.001	36.28

3 结果与分析

3.1 单位径流功率随时间和坡度的变化

根据在试验过程中测定的试验流速, 采用 Yang

C T^[10] 对单位径流功率的定义, 可以直接计算出试验的单位径流功率。图 1 和图 2 是根据土槽冲刷试验数据计算结果点绘的单位径流功率随坡度和流量的变化曲线。

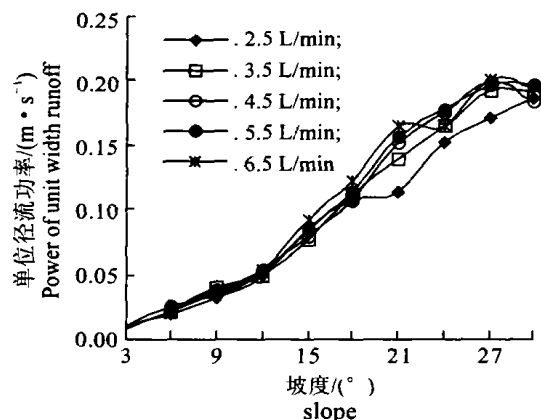


图1 单位径流功率随坡度的变化规律

Fig. 1 Change of runoff power with slope

从图1可以看出, 坡度为3~27时, 相同流量下的单位径流功率随坡度增加而逐渐增大。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。在不同的流量条件下, 单位径流功率随坡度的变化规律具有相似趋势。在相同的坡度下, 单位径流功率随流量的增加缓慢增加(图2)。坡度越大, 这种增加趋势就越明显。根据单位径流功率的定义可知, 单位径流功率是径流流速与能坡综合作用的结果, 因此单位径流功率随坡度和流量的变化规律具有流速和能坡综合

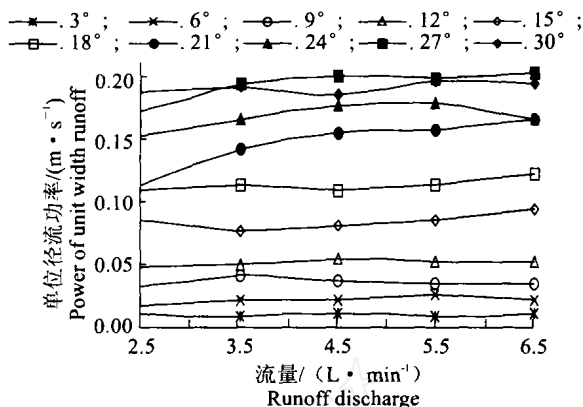


图2 单位径流功率随流量的变化规律

Fig. 2 Change of runoff power with discharge

作用的特征。

3.2 利用单位径流功率理论对侵蚀状况的预测

根据试验的条件和Moor等^[12]的经验, 对本试验中的径流单宽产沙率进行计算和分析, 而后与试验的实测数据进行比较, 根据两者的吻合程度, 判断该方法应用于土壤侵蚀计算和预测的可行性。图3为根据试验实测数据点绘得到的坡面径流单宽产沙量随坡度的变化图, 图4为利用单位径流功率理论对坡面侵蚀状况进行计算而得到的预测结果。

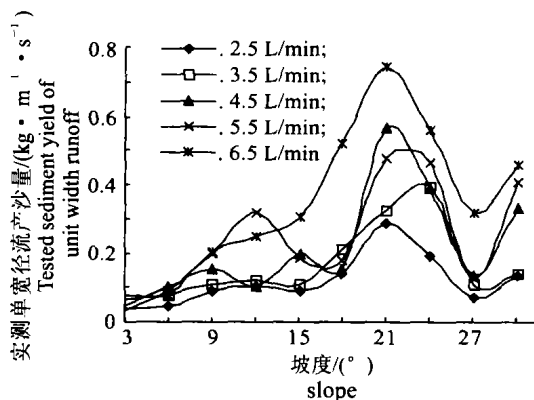


图3 实测单宽径流侵蚀产沙量

Fig. 3 Tested sediment yield of unit width runoff

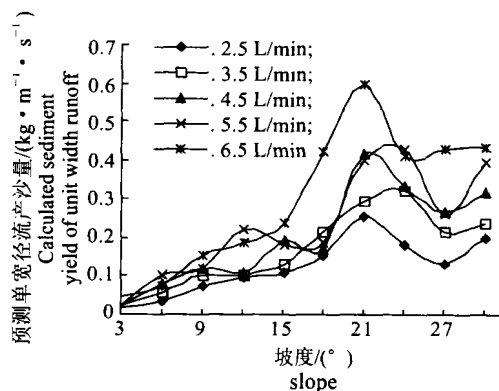


图4 基于径流功率理论计算的单宽径流侵蚀产沙量

Fig. 4 Calculated sediment yield of unit width runoff by runoff power theory

比较图3、4可以发现, 预测的单宽产沙量与实测的单宽产沙量随坡度的变化趋势基本相同, 即两者都随坡度的增加呈抛物线形变化, 坡面单宽径流侵蚀产沙量的最大值都出现在坡度为21左右。

图5为预测与实测的单宽径流产沙量的比较图。从图5可以看出, 两者之间具有良好的线性关系。对两者进行回归分析可以得到以下关系式:

$$W_s = 1.1214W_p - 0.0107, R^2 = 0.8689 \quad (11)$$

式中, W_s 为实测的单宽产沙量 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); W_p 为预测的单宽产沙量 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。由上式可知, 尽管预测与实测的单宽产沙量存在一定差异, 但其随坡度和流量的变化趋势基本相同, 且两者之间呈明显的线性关系。这一结果表明, 在给定流量、坡度及泥沙粒径、沉降速度等条件下, 单位径流功率理论可以

合理地用于计算坡面径流产沙量。

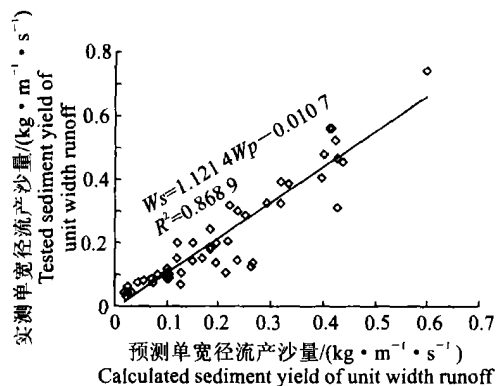


图 5 单宽径流侵蚀产沙量实测值与计算值的关系

Fig 5 Correlation between tested and calculated sediment yield

4 结论与讨论

本研究用径流功率理论对不同坡度和流量条件下的侵蚀产沙规律进行了分析比较, 得到以下结论:

(1) 在坡度为 $3^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 时, 相同流量下的单位径流功率随坡度增加而逐渐增大, 当坡度增加到 27° 左右时, 单位径流功率达到最大值。在相同的坡度下, 单位径流功率随流量的增加缓慢增大。坡度越大, 这种增加趋势越明显。

(2) 比较试验实测数据和利用单位径流功率理论计算的结果发现, 二者之间具有良好的线性关系, 关系式为: $W_s = 0.1214W_p - 0.0107$ 。说明径流侵蚀功率理论可以较好地用于坡面侵蚀产沙的分析与预测。

值得指出的是, 单位径流功率理论最初是应用于明渠水流的, 尽管 Moor 和 Burch 研究^[12]证明该理论可直接用以描述坡面侵蚀过程, 但由于该理论在土壤侵蚀研究中的应用实践较少, 且对于部分参数, 如临界单位径流功率等的确定及适用的土壤类型尚缺乏具体研究, 因此, 虽然单位径流功率理论可能是一种研究土壤侵蚀过程的有效理论, 但其在土壤侵蚀研究中的应用尚需不断实践和完善。

[参考文献]

- [1] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(6): 1900- 1906
- [2] Abraham S A D, Li G, Parson A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope Southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21: 35- 47.
- [3] Li Z B, Shao M A, Wang Z L, et al Modeling on the inter-rill erosion in the Loess Plateau of China[J]. International Journal of Sediment Research, 1999, 14(2): 319- 324
- [4] 张科利. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41- 46
- [5] Emmett W W. Overland flow in hillslope hydrology[A]. Kirkby M J. Hill slope hydrology[C]. New York: John Wiley & Sons, 1978. 145 - 175
- [6] Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins, Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bull Geol Soc Am, 1945, 56: 275- 370
- [7] Yang N Y, Harry G W. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall[J]. ASCE, 1971, 97(9): 1367- 1386
- [8] 鲁克新, 李占斌. 黄土坡面细沟侵蚀发生初期跌坎形成机理的理论探讨[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 35- 38
- [9] Li Z B, Lu K X, Ding W F. Study on the dynamic process of rill erosion on loess slope surface[J]. International Journal of Sediment Research, 2001, 16(1): 308- 314
- [10] Yang C T. Incipient motion and sediment transport[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99: 919- 934
- [11] 杨志达. 泥沙输送理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 109- 116
- [12] Moor I P, Burch G I. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory[J]. Water Resources Research, 1986, 22(8): 1350- 1360

Application of unit runoff power theory for sediment yield calculation on loess slope

CUI Wen-bin^{1a}, LI Peng^{1b, 2}, LI Zhan-bin², RU Hua-nan³

(1 a College of Resource and Environment, b College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3 Agriculture and Forestry Company, Yima Coal Group, Yima, Henan 472300, China)

Abstract: This paper introduced basic principle of unit runoff power theory first, and then it was applied in runoff scouring experiment for the sediment yield calculation and comparison under different slopes and runoff discharges. Results indicated that when slope was between 3° and 27° , unit runoff power increased with the increase of slope, and its maximum value appeared at 27° slope, which tended to decrease after it was over 27° . There were similar trends in both observed data and the calculated data by unit runoff power theory, which changed with slope like parabola, and the maximum data appeared at 21° slope. Further analysis indicated that linear relation existed between observed data and calculated data, which implied that it is possible to interpret sediment yield on slope by unit runoff power theory.

Key words: runoff power; soil erosion on the slope; sediment yield calculation

(上接第 102 页)

Abstract ID: 1671-9387(2005)09-0099-EA

Multi-objective analysis of city water resources' carrying capacity

ZHAO Xin-yu¹, FEI Lian-jun¹, GAO Chuan-chang²

(1 College of Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Department of Hydraulic Engineering, North China Water Convenience and Hydroelectric College, Zhengzhou, Henan 450011, China)

Abstract: Based on the feature of city water resources system, this thesis discussed the concept of city water resources' carrying capacity and established the multi-objective analytic model and the hierarchy analytic model to analyse the city water resources' carrying capacity which proved effective. Some new viewpoints were discussed in this thesis, such as the economic model of the city water resources carrying capacity, the measure of social object, the prediction and calculation of city water consumption.

Key words: city water resources; carrying capacity; multi-objective analysis; analytic hierarchy process