

黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究

李 鹏^{1,2}, 李占斌¹, 郑良勇³

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 西北农林科技大学
林学院, 杨凌 712100; 3. 山东省水利勘测设计院, 济南 250013)

摘 要: 通过室内土槽放水冲刷实验, 研究了黄土区陡坡侵蚀产沙特性。结果表明径流输沙率随径流流量的增加而增加, 径流输沙率随坡度呈抛物线形式变化, 当坡度在 21°~24° 之间时输沙率最大; 径流剪切力也具有类似变化。泥沙输移率与径流剪切力之间存在线性关系, 径流临界剪切力为 1.701 N/(m²·m·in), 发生细沟侵蚀的临界径流水深与坡度正弦值成正比。在实验条件下, 坡面中上部土壤的侵蚀量占总侵蚀量的很大比重, 表明土壤侵蚀主要发生在坡面中上部, 坡面下部侵蚀微弱, 以搬运上部来沙为主。

关键词: 陡坡; 输沙; 临界剪切力; 黄土

中图分类号: TV 143⁺. 1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)07-0042-04

李 鹏, 李占斌, 郑良勇 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 42- 45

Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong Indoor experiment of characteristics of runoff erosion in loess steep slope[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 42- 45. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

近年来, 国内外学者对于土壤侵蚀过程和机理进行了深入研究, 并取得了许多成果, 认为坡面径流侵蚀过程其实就是径流剥离土壤、泥沙输移和沉积不断影响和制约的过程^[1-4]。其中径流分离土壤过程是土壤侵蚀发生的前提和基础, 研究坡面径流分离土壤的能力具有重要意义。目前对其研究一般都是基于径流剪切力和径流功率的基础上。Foster 和 Meyer^[3,4]综合分析研究了坡面径流侵蚀过程, 提出了以下关系式:

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{Q_s}{T_c} = 1 \quad (1)$$

式中 D_r ——径流分离速率; D_c ——径流分离能力; Q_s ——径流输沙率; T_c ——径流挟沙力。其中 $D_c = K(\tau - \tau_c)$, K ——土壤可蚀性参数; τ ——径流剪切力; τ_c ——径流临界剪切力。上式表明只有当径流剪切力大于临界剪切力时, 才会发生径流分离和输移。根据曼宁公式, 径流剪切力可以用下式计算^[5,6]

$$\tau = \gamma h_w \sin \theta$$

式中 γ ——水流重度, N·m⁻³; h_w ——水深, m; θ ——坡度, (°)。

从土壤侵蚀发生的机理角度, 土壤侵蚀程度的大小不仅取决于引起土壤侵蚀的外部动力, 而且也取决于土壤的可蚀性参数和土壤的临界抗剪切应力^[7]。这两个参数反映了土壤可蚀性的程度和抵抗水流作用下土壤产生侵蚀的能力, 是定量计算土壤流失的重要指标, 也是

土壤侵蚀预报模型中的必要参数。近几十年来, 很多学者依据土壤抗剪切强度探讨了土壤可蚀性方面进行了大量工作^[8-10]。Gilley 等人曾建立了细沟产生与临界剪切应力之间的经验关系, 用细沟侵蚀泥沙剥蚀能力方程来计算临界剪切应力^[8]。Govers 等在室内水槽实验中发现, 当坡面径流处于层流到过渡流状态时, 其含沙量与剪切应力有关^[11,12]。在欧洲的 EROSEM 和 LISEM 模型中, 径流分离能力又被定义为单位水流功率的函数, 其理论基础为 Govers 的室内实验^[12]。但是这些实验多集中于缓坡, 不适用于坡陡沟深的黄土高原, 因此系统研究黄土区陡坡细沟径流分离和输沙特性, 对于深入了解陡坡侵蚀的发生发展机理, 制定陡坡水土流失防治措施具有重要意义。

本文在室内放水冲刷实验的基础上, 研究了陡坡细沟径流分离土壤和泥沙输移特性, 建立了径流剪切力与单宽径流输沙率的关系式, 以期对了解黄土高原陡坡径流侵蚀过程提供参考。

1 实验设计

室内实验在可调坡度钢制土槽进行, 土槽长 4 m、宽 0.33 m、深 0.5 m^[13]。实验流量按黄土高原暴雨发生频率在野外标准径流小区上产生的单宽流量换算到实验土槽上的流量得到, 分别为 2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 L/m·in 5 个流量, 坡度采用 15°、18°、21°、24°、27°、30° 6 级变化。实验土壤为杨凌当地娄土, 分层填充砸实, 使土壤上下均匀, 容重控制在 1.25 g/cm³ 左右, 实验前土槽洒水使土壤表层达到饱和。实验用颜料示踪法分 4 个断面每分钟测量一次流速; 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; 土槽出水口每隔一分钟接取泥沙样以烘干获得含沙量, 接取全部径流泥沙样以计算侵蚀量。实验进行 2 次重复。实验土壤粒径组成如表 1 所示。

收稿日期: 2004-09-28 修订日期: 2005-01-10

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

作者简介: 李 鹏(1974-), 男, 山东烟台人, 博士, 从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院。

E-mail: lipeng74@163.com



表 1 实验土壤的粒径组成

Table 1 Particle composition of experimental soil

粒径/mm	1.0~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001
百分比/%	0.12	2.70	6.88	41.13	12.89	36.28

2 结果与分析

2.1 陡坡径流输沙特性

坡面径流在顺坡向下流动的过程中, 会对坡面土壤产生剪切冲刷力, 而土壤同时又具有抵抗此力的能力。当径流冲刷力大于土壤抗冲力时, 土粒便会被径流分离带走, 从而产生土壤侵蚀。这一过程随着坡度和径流流量的变化而变化, 也随着径流冲刷时间的不断延长而变化。图 1 为实验条件下不同坡度和流量下径流单宽输沙率的变化图。

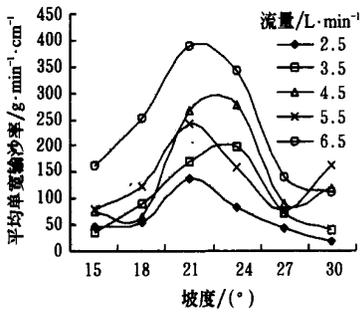


图 1 不同坡度、流量径流单宽输沙率变化图

Fig 1 Sediment yield of unit width runoff under different slopes and runoff discharges

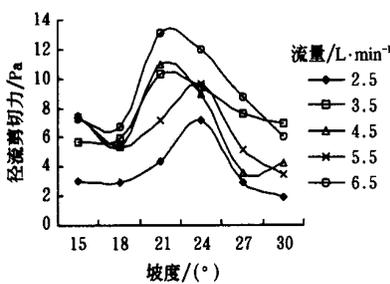


图 2 不同坡度、流量径流剪切力变化图

Fig 2 Shear strength of unit width runoff under different slopes and runoff discharges

由图 1 可以看出, 在相同坡度下随着径流流量的增加, 径流单宽输沙率随之增加。在相同流量条件下, 随着坡度的增加, 径流输沙率呈抛物线形式变化。当坡度在 21 和 24 之间时输沙率最大。这说明坡面径流输沙率在随坡度变化过程中存在临界现象, 当坡度小于临界坡度时, 输沙率随着坡度增大而增大; 当坡度大于临界坡度时, 输沙率则随坡度增大而减小。在本实验条件下, 此临界坡度值在 21°~24° 之间。出现上述现象的原因可能是径流剪切分离土壤能力与土壤抗蚀抗冲能力随坡度的相互消长。

土壤侵蚀过程实质上是径流剥离土壤、泥沙输移和沉积的过程, 因此坡面径流作用在土壤上的剪切力必然与径流剥离土壤有关。在陡坡放水冲刷的实验条件下, 由于坡度较陡, 水流的流速大, 可以假设实验过程中没有发生泥沙沉积, 因此出水口的泥沙输移率与径流分离剥蚀率相等。图 2 为径流剪切力随坡度和流量的变化图。由图中可知, 其变化趋势与径流输沙率的变化基本相同。在相同的坡度条件下, 径流剪切力随流量的增加而增加。当流量相同时, 剪切力随坡度呈抛物线形式变化。径流剪切力的临界坡度也在 21°~24° 之间, 这表明径流输沙率与径流剪切力存在紧密关系。

2.2 陡坡径流临界动力条件

坡面上土壤侵蚀产沙是由于坡面径流在顺坡流动的过程中, 径流对坡面土壤剪切剥离作用和土壤抗剥离作用以及地面物质补充能力之间相互对比协调的结果。根据 Foster 等人的研究结果, 径流剥离率与径流剪切力之间存在以下关系式

$$D_c = K_d(\tau - \tau_c) \quad (2)$$

式中 D_c ——泥沙剥离率; K_d ——土壤可蚀性参数; τ ——径流剪切力; τ_c ——径流临界剪切力。上式表明, 当径流剪切力大于临界剪切力时, 土壤便被径流分离剥离, 当径流剪切力小于临界剪切力时, 则不会发生土粒分离现象^[5]。

假设在细沟侵蚀过程中没有发生泥沙沉积现象, 坡面上所有分离的土壤都被径流带出出水口, 即泥沙剥离率等于泥沙输移率。则上式可以变为

$$D_r = K_d(\tau - \tau_c) \quad (3)$$

式中 D_r ——泥沙输移率, 其它同上式。

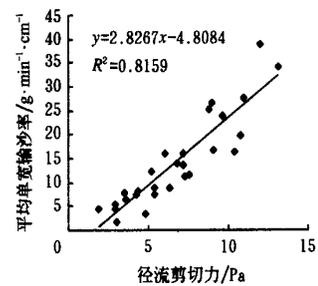


图 3 单宽径流输沙率与径流剪切力相关关系

Fig 3 Correlation between sediment yield of unit width runoff and shear stress

对实验中不同流量和坡度条件下, 坡面单宽径流输沙率与径流剪切力进行回归分析。结果表明(图 3), 坡面单宽径流输沙率与径流剪切力之间具有明显的线性关系, 其关系表达为 $y = 2.8267x - 4.8084$, 进一步整理可以得到: $y = 2.827(x - 1.701)$ 即

$$D_r = 2.827(\tau - 1.701) \quad (4)$$

从(4)式可以看出实验土壤的可蚀性参数 K_d 大小为 2.827 g/(m in · N), 其物理意义是单位牛顿的剪切力每分钟剥离输移 2.827 克土壤。径流的临界剪切力大小为 1.701 N/(m² · m in), 表明在实验中只有当径流剪切力大于 1.701 N/(m² · m in) 时, 才发生土粒剥离输移。

根据径流剪切力的计算公式可知, $h_w = \tau / (\gamma \cdot \sin \theta)$, 由临界剪切力可以推得发生细沟侵蚀的临界径流水深为 $0.174 \times 10^{-3} / \sin \theta (\text{m})$ 。式(4)对于研究坡面细沟侵蚀过程具有重要意义。如果在已知径流剪切力的情况下, 可以根据(4)式计算出坡面径流泥沙输移率。

2.3 细沟侵蚀过程

在实验中沿坡面纵向分为 12 个断面, 每个断面每分钟都可以分别计算其径流剪切力, 利用式(4)可以求得各断面每分钟的输沙率。比较各值在时间和空间上的差异就可以得到细沟侵蚀发育过程。

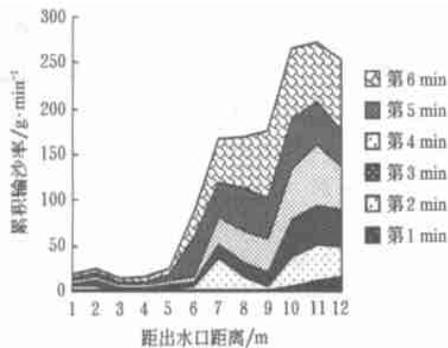


图 4 坡面径流输沙率时空变化 ($q = 5.5 \text{ L/m in}, S = 24^\circ$)

Fig 4 Temporal and spatial changes of sediment transportation ratio ($q = 5.5 \text{ L/m in}, S = 24^\circ$)

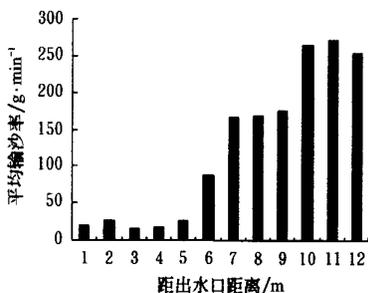


图 5 坡面平均输沙率变化图 ($q = 5.5 \text{ L/m in}, S = 24^\circ$)

Fig 5 Changes of average sediment transportation ratio ($q = 5.5 \text{ L/m in}, S = 24^\circ$)

图 4 和图 5 分别为坡度 24° 流量 5.5 L/m in 时输沙率面积变化图和平均输沙率柱状图。由图中可以看出, 实验过程中坡面下部即离出水口 1.5 m 以内径流剥蚀率很小, 且随时间变化不大, 说明这里侵蚀微弱, 仅以搬运上部来沙为主。当实验进行到第 2 分钟时, 距出水口 1.8 m 处输沙率剧增, 表明此处细沟开始发育。随着时间的延续, 细沟逐渐下切侵蚀, 侧蚀和溯源侵蚀, 侵蚀量便大增。从图 5 可以看出, 坡面中上部土壤的剥蚀侵蚀量占总侵蚀量的很大比重, 表明在冲刷实验条件下, 土壤侵蚀主要发生在坡面中上部。

3 结论

1) 通过土槽放水冲刷实验可知, 随着径流流量的

增加, 径流输沙率增加; 径流输沙率随坡度呈抛物线形式变化, 当坡度在 $21^\circ \sim 24^\circ$ 之间时输沙率最大。径流剪切力随流量的增加而增加。当流量相同时, 剪切力随坡度呈抛物线形式变化。径流剪切力的临界坡度也在 $21^\circ \sim 24^\circ$ 之间, 这表明径流输沙率与径流剪切力存在紧密关系。

2) 泥沙输移率与径流剪切力之间的关系式为 $D_r = 2.827(1 - 1.701)$, 径流的临界剪切力大小为 $1.701 \text{ N/(m}^2 \cdot \text{min)}$, 发生细沟侵蚀的临界径流水深为 $0.174 \times 10^{-3} / \sin \theta (\text{m})$ 。

3) 在室内实验条件下, 坡面中上部土壤的剥蚀侵蚀量占总侵蚀量的很大比重, 表明土壤侵蚀主要发生在坡面中上部, 坡面下部侵蚀微弱, 以搬运上部来沙为主。

[参 考 文 献]

- [1] Meyer L D, Foster G R. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow [J]. Transactions of the A S A E, 1965, 8(4): 689- 693
- [2] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395- 400
- [3] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles [J]. Transactions of the A S A E, 1977, 20(4): 678- 682
- [4] Foster G R, Meyer L D. A closed-form soil erosion equation for upland area[A]. In: Shen H W. symposium of sedimentation[C]. Colorado, 12 1- 12 7, 1972
- [5] 张科利, 秋吉康宏. 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
- [6] Nearing M, Foster R, Lane J, et al. A process-based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project Technology[J]. Transactions of the A S A E, 1980, 32(5): 1587- 1593
- [7] Ghebreyessus Y T, Gantzer C J, Albert E E, et al. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density[J]. Transactions of the A S A E, 1984, 37(6): 1791 - 1797.
- [8] Gilley J E, Eltobi W J, Laflen J M, et al. Critical shear stress and critical flow rate for initiation of rilling[J]. J. of Hydrology, 1933, 142, 251- 271.
- [9] 雷俊山, 杨勤科. 坡面薄层水流侵蚀实验研究及土壤抗冲性评价[J]. 泥沙研究, 2004, (6): 23- 26
- [10] 张晴雯, 雷廷武, 潘英华, 等. 细沟侵蚀蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(4): 468- 475
- [11] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds [J]. Earth Surf Process Landforms, 1986, 11: 515- 528
- [12] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow: erosion, transport, and deposition process[M]. LAHS Publ, 1990, 189: 45- 63
- [13] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性实验研究[J]. 水利学报, 2004, (5): 46- 51.

Indoor experiment of characteristics of runoff erosion in loess steep slope

Li Peng^{1,2}, Li Zhanbin¹, Zheng Liangyong³

(1. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Forestry College, Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;

3. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China)

Abstract: The flume scouring experiment indoors was conducted to study the runoff erosion characteristics in loess slope. Results showed that the sediment transportation ratio increased with the discharge of flow increased and changed in parabola form with the slope gradient. The sediment transportation ratio reaches the maximum value when slope gradient is between 21‰ and 24‰. The flow shear stress had the same trend. Linear relationship existed between sediment transportation ratio and shear stress, and critical shear stress of the flow was $1.701 \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, consequently the critical flow depth for the occurrence of rill erosion had inverse ratio with the sine value of slope gradient. In this experiment, the sediment mostly came from the middle and the top parts of the slope, while had little erosion in the below part of slope, which was only transported the sediment from the up-slope.

Key words: steep slope; sediment transportation; critical shear stress; loess

中国工程院专项咨询项目“农业机械化发展战略研究”项目、 课题负责人及部分特邀专家工作会议简况

时间: 2005年7月20日

地点: 北京 中国农业大学国际会议中心

会议简况:

中国工程院“农业机械化发展战略专项咨询项目”项目、课题负责人及部分特邀专家工作会议于2005年7月20日在中国农业大学国际会议中心召开。中国工程院项目组的领导、各课题的负责人和特邀来自有关大学、科研院所、农机管理部门的领导、专家共40余人参加了会议。会议主要是听取各课题和专题负责人有关研究准备工作的汇报,交流研究各课题、专题的研究思路、工作方案和今年的工作计划。

会议由汪懋华院士主持,首先汇报了前期工作的概况和研究工作的组织方案(详见附录),然后请项目组长沈国舫副院长和副组长姚福生院士作了工作指示,农业部农机化管理司王智才司长对项目研究发表了表示热情支持的讲话。然后相继由各课题与专题负责人进行了汇报。随后与会专家进行了广泛的讨论,提出了不少意见和建议,在此基础上,又由各专题组分组深入地研讨各自的研究思路和工作计划。会议还确定今年项目组要统一组织对山东、江苏的玉米、水稻生产农机化情况进行深入的调研,并计划组织部分研究人员去印度、韩国等地进行相关的考察。

附录:项目研究工作的组织与分工:

1. 成立项目研究综合组 由项目负责人沈国舫副院长任组长,汪懋华院士、姚福生院士任副组长,综合组由两学部有关院士、知名专家和课题组负责人等组成。

2. 成立项目顾问组 聘请中国工程院、农业部等主管部门相关领导、专家,中国农机工业协会领导及有关专家,UNEPCEAM中方领导等作为项目组顾问,指导本项目研究工作。

3. 成立项目管理办法办公室 由工程院学部工作局,国际合作局,农业、轻纺与环境工程学部办公室,机械与运载工程学部办公室和中国农业大学项目综合工作组有关人员组

成。

4. 成立项目综合工作组 挂靠中国农业大学教育部重点实验室,负责协调项目各课题研究过程,组织跨课题综合调研活动,编辑项目工作简报,综合各部分研究成果和编写综合研究报告。

5. 在项目研究综合组下设4个课题组 负责课题研究工作。各课题组根据课题目标,可下设若干专题组开展专题调查研究。

项目研究综合组下设立4个课题组:

1) 农机化组

组 长:汪懋华院士、蒋亦元院士,负责课题组总体协调
副组长:罗锡文,高焕文,何堤,麻硕士

设4个区域发展专题组:

北方组:组长高焕文,中国农业大学

南方组:组长罗锡文,华南农业大学

东北组:组长何堤,黑龙江农业机械工程科学研究院

草原组:组长麻硕士,内蒙农业大学

2) 农业装备组

组 长:姚福生院士,中国工程院机械与运载工程学部

副组长:高元恩,中国农业机械工业协会

3) 拓展研究组

组 长:朱 明,农业部规划设计研究院

副组长:李保明,中国农业大学

4) 保障组

组 长:张百良,河南农业大学(政策保障研究)

副组长:韩鲁佳,中国农业大学(科技创新体系研究)

另外,还设立了项目综合工作组

组 长:李民赞,中国农业大学

副组长:赵 罡,北京航空航天大学

(本刊辑)