

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2020.01-10

# 红壤坡面侵蚀发生的临界条件

黄旭华, 陈 铮

(江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

**摘 要:** 采用可移动式降雨侵蚀槽进行放水冲刷试验, 研究了红壤坡面侵蚀产沙强度与坡面径流能耗的关系, 并分析得到土壤侵蚀发生的临界平均径流能耗值。研究表明: 运用能量守恒原理得出坡面径流能耗, 在 4 种不同坡度条件下, 径流能耗越大, 坡面产沙强度也越大; 在径流能耗相同的情况下, 坡度越大, 产沙强度越大; 建立坡面产沙强度 ( $Dr$ ) 与径流能耗 ( $\Delta E$ ) 之间的关系, 两者存在良好的线性关系:  $Dr=2.8425\Delta E-15.172$ , 可用此进行坡面产沙强度的估算; 土壤侵蚀发生存在有一定的临界径流能耗, 在试验研究的范围内, 可得到红壤坡面侵蚀发生临界平均径流能耗为 5.34J/min。

**关键词:** 侵蚀; 径流能耗; 产沙强度; 临界径流能耗

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2020)01-0062-04

## 0 引 言

中国红壤主要分布在长江以南的低山丘陵区, 土地面积约  $217.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 受亚热带、热带气候影响, 冬季温暖干旱, 夏季炎热潮湿, 土壤侵蚀以水蚀为主, 侵蚀面积达  $61.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 成为中国最严重的水土流失区之一, 严重威胁着粮食和生态安全<sup>[1-4]</sup>。

国内外 100 多年来的研究表明, 在影响土壤侵蚀的降雨径流因子、地形地貌因子、植被因子、土壤因子、水土保持措施因子等诸多因素中, 土壤作为被侵蚀的对象, 土壤因子被认为是影响土壤侵蚀五大因子中最重要因子。对其进行深入研究并做出正确评价一直是国内外土壤侵蚀学者致力研究的重要问题之一<sup>[5-7]</sup>。

国内外关于土壤因子的研究, 主要是与土壤侵蚀预报相适应的土壤抗侵蚀性能(或称可蚀性)的研究。土壤可蚀性的研究基本上是利用黑箱化的方法, 探讨其与主要土壤理化指标(质地指标、有机质含量、结构指标、渗透性指标)之间的统计关系, 构建相关模型、建立数据库并编制有关基础图件。这方面以美国为代表进行了大量的研究, 形成了比较完整的算法, 对于世界

范围的土壤侵蚀机理研究、土壤侵蚀预报等产生了广泛和深刻的影响。在国内, 围绕 USLE、RUSLE 的学习与引进, 对土壤可蚀性也进行了比较多的实验研究。尤其是近年来, 我国学者围绕建立中国水土流失预报模型, 也开展了富有成效的土壤可蚀性实验研究。但上述研究大多是基于统计学方法研究某些土壤理化性质与土壤可蚀性的关系, 构建可蚀性与土壤理化性质的估算模型, 不仅计算模型参数多, 部分参数取值困难, 受人为因素影响较大(如渗透等级、结构系数等), 而且存在着土壤颗粒粒径在美国制与国际制间的转换问题, 很难将其直接套用于国内大区域尺度上的土壤可蚀性评价。因此, 对于进一步加强土壤可蚀性表征方法的研究显得必然重要。本文通过放水冲刷试验, 运用能量守恒原理对坡面土壤侵蚀发生的临界条件进行了研究, 研究成果对深化认识坡面侵蚀动力学机理及建立坡面侵蚀预报模型提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

本研究进行放水冲刷试验采用可移动式降雨侵蚀

收稿日期: 2019-11-12

作者简介: 黄旭华(1990-), 男, 硕士, 工程师。

槽,其坡度可在 0°~30°之间调节,长 3.00m,宽 1.00m,高 0.50m。侵蚀槽底部每隔 2.00cm 钻有 5.00mm 小孔,当土壤达到饱和时用来排出下渗的雨水。侵蚀槽的下端面同样钻有 5.00mm 小孔,并在上部及下部装置了三角型集流槽,用来收集地面径流和壤中流。试验土槽上方为恒压水箱,以保证放水试验时出流量的稳定,通过水泵将水流供给供水箱,控制供水箱阀门,稳定供水箱水位以达到控制恒定流量,再经稳流槽过渡、消能,使水流均匀流入试验土槽,试验设计示意图见图 1。

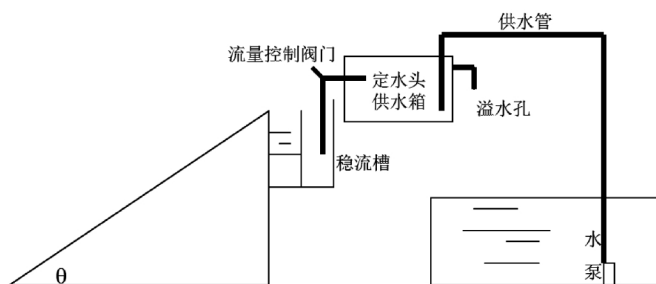


图 1 试验设计示意图

试验设计 5°、10°、15°、20°四个坡度,放水流量通过阀门进行控制,试验流量选定主要根据模拟降雨的雨强来定,按相应雨强在坡面单宽内的产流量大小依次选取 5 个不同放水流量强度,分别为 1.35L/min、3.00L/min、5.50L/min、6.50L/min、8.00L/min。每次试验结束后均放置 1 天,再进行下一场试验,确保试验条件一致及试验精度。

1.2 试验方法

试验采用的红壤来自湖北武汉沌口坡耕地表层土,其粒径组成如表 1 所示。

土壤样品先自然风干,经 15mm 筛筛选后,装入降雨侵蚀槽中。为了确保试验土土层容重均匀,采用分层填装的方法,边填边压实,确保整个坡面的填土厚度及紧实状况。

每次试验的土壤含水量不宜相差过大,故试验开始前,需测定土壤含水量,根据实际测量结果采用先降一场小雨或者隔一段时间的方式,确保试验土壤前期含水量基本一致。

试验开始后,观察坡面产流情况,并记录产流时间。同时开始测量坡面上径流流速(采用颜料示踪法分段测量,按照坡上、中、下 3 个不同部位)及采集坡面出口的径流泥沙样,取样时间间隔 1、1、1、2、2、3、5、5、5……5min。每次试验后,各个径流泥沙样的含沙量,计算坡面出口的含沙量及产沙强度。

2 坡面径流侵蚀能量分析

土壤侵蚀可以看作是一种做功的过程,而做功必然要损失能量,损失的能量被用于侵蚀过程,使土壤团粒分散,引起地表径流紊动、冲刷以及输移土壤颗粒等<sup>[8]</sup>。对于放水冲刷试验,坡面水流由坡顶向坡下流动的过程中,能量将会损失掉一部分,可利用能量守恒来分析水流自坡顶到坡面上任一断面间的能量损耗,坡面放水试验见图 2 所示。

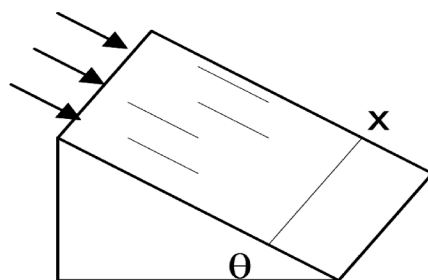


图 2 坡面放水试验

坡顶断面处的径流具有的势能为  $E_{势}=\rho g q L \sin \theta$ ,动能为  $E_{动}=\frac{1}{2} \rho q V_0^2$ ,则坡顶断面的总能量为:

$$E_{总}=\rho g q L \sin \theta+\frac{1}{2} \rho q V_0^2 \quad (1)$$

式中:  $L$  为试验土槽坡长;  $\theta$  为坡度;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $q$  为放水流量强度;  $V_0$  为坡顶水流流速。

由于能量损耗,坡面上任意断面处的能量应根据该断面的水流流速与径流量来计算,即:

表 1 试验土壤粒径组成

土壤粒径/mm	>1	1~0.1	0.1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.002
百分比/%	2.24	11.40	26.06	15.03	11.29	20.06	13.87

$$E_x = \rho g q' (L-X) \sin\theta + \frac{1}{2} \rho q' V_x^2 \quad (2)$$

式中： $q'$ 为坡面 $X$ 断面处的径流流量； $V_x$ 为该断面处的水流流速。其余参数意义同上。

因此，水流自坡顶到坡面上任一断面间的能量损耗为：

$$\Delta E_{耗} = E_{总} - E_x \quad (3)$$

对式(3)进行时间和长度的积分，并将式(1)和式(2)代入可得到在整个试验过程中所消耗的能量，即：

$$E_{耗} = \int_0^T \int_0^L (\rho g q' L \sin\theta + \frac{1}{2} \rho q V_0^2 - \rho g q' (L-X) \sin\theta - \frac{1}{2} \rho q' V_x^2) dx dt \quad (4)$$

式中： $T$ 为试验放水总历时。其余参数意义同上。

可根据水量平衡原理计算式中任意断面处的径流流量 $q'$ 。由于放水装置出口端贴近坡面顶端，且水流先经过稳流槽消减水流紊动，故放水水流在坡顶的速度极小，可忽略不计。

### 3 结果分析

根据实验数据所得的结果，点绘坡面径流侵蚀产沙强度与径流能耗之间的关系，如图3所示。

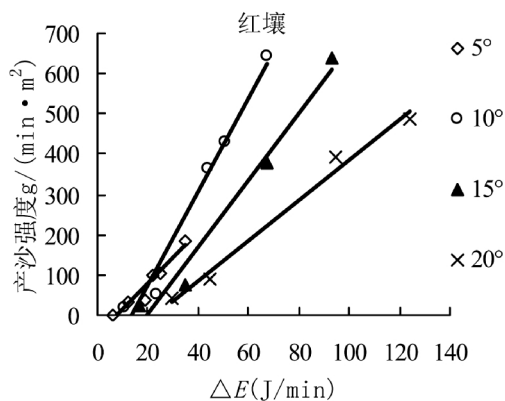


图3 坡面径流侵蚀产沙强度与径流能耗关系

图3可反映红壤坡面在不同坡度、不同放水流量强度条件下坡面产沙强度与径流能耗的关系。在4种不同坡度条件下，径流能耗越大，坡面产沙强度也越大；在径流能耗相同的情况下，坡度越大，产沙强度越大。其原因可能为：一是在其他条件基本一致的情况

下，径流能耗越大，坡面径流对土壤颗粒的冲刷作用越大；二是坡度影响着坡面土壤颗粒的稳定性，坡度越大，土壤颗粒的稳定性越差，坡面剪切应力越大，进而增加其分离能力。

4种坡度条件下坡面产沙强度与径流能耗的关系走势基本一致，现将实测资料中坡度因素去除，进一步分析坡面侵蚀过程中径流侵蚀产沙强度与径流能耗的关系，可拟合出如下一般形式：

$$D_r = \alpha \Delta E - C_0 \quad (5)$$

式中： $D_r$ 为产沙强度； $\alpha$ 为土壤可蚀性相关系数； $\Delta E$ 为径流在坡面上的能耗； $C_0$ 为与坡面侵蚀发生的临界能耗相关参数。

红壤放水冲刷试验去除坡度因素产沙强度与径流能耗的拟合关系表达式见表2。

表2 产沙强度与径流能耗拟合结果

土壤类型	表达式	相关系数 $R$
红壤	$D_r = 2.8425 \Delta E - 15.172$	0.845

根据表2，红壤产沙强度与径流能耗拟合结果其相关系数 $R$ 大于0.8，故坡面侵蚀过程中侵蚀产沙强度与径流能耗在排除坡度影响因素条件下仍存在较好的线性关系，而且还具有明确的物理意义，即坡面侵蚀的发生存在有一定的临界径流能耗，并且从图4中各坡度下的径流能耗和产沙强度的关系走势中可见，在不同的坡度条件下，坡面土壤侵蚀发生的临界能量值是不同的。利用表2的计算结果，在试验研究的范围内，可得到红壤坡面侵蚀发生临界平均径流能耗为5.34J/min。

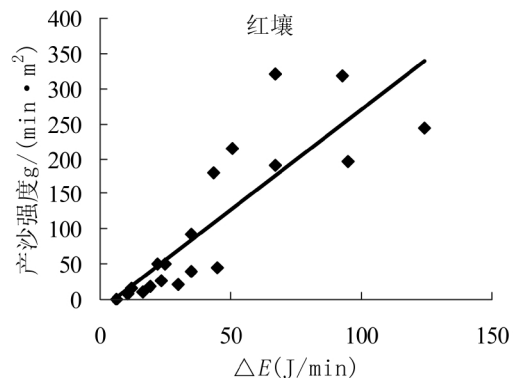


图4 去除坡度影响条件下产沙强度与径流能耗的关系

## 4 结 论

(1) 利用能量守恒原理推导出了水流自坡面顶端到坡面任一断面间的径流能量损耗的理论公式,并计算了坡面径流过程、下渗率及坡面平均流速,进而将径流能耗理论公式简化为简单的数学表达式,从而得出坡面产沙强度与径流能耗的关系:在放水冲刷试验条件下,径流能耗越大,坡面径流产沙强度越大;在径流能耗一定的条件下,坡面产沙强度随坡度的增大而增大。

(2) 分析红壤坡面产沙强度与径流能耗的关系,并拟合出了一般形式。在放水冲刷试验条件下分析得出了红壤、紫色土、黑土及黄土坡面侵蚀发生的临界平均径流能耗,分别为:5.34J/min、11.50J/min、5.28J/min、5.23J/min。

(3) 在放水冲刷试验条件下分析得出了红壤坡面侵蚀发生的临界平均径流能耗为5.34J/min。

## 参考文献:

- [1] 王玉朝. 红壤侵蚀特征与环境因子的关系[J]. 云南地理环境研究, 2013, 25(1): 30~35.
- [2] 汪邦稳, 肖胜生. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239~243.
- [3] 李锐. 中国水土流失基础研究的机遇与挑战 [J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 6~11.
- [4] 林学军, 谭仕彦. 红壤坡地耕作模式与水土流失监测初报[J]. 广西农学报, 2002, S: 50~53.
- [5] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 中国科学技术出版社, 2001, 6648.
- [6] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345~350.
- [7] 张科利, 彭义英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7~14.
- [8] 王佑民, 郭培才, 高维森. 黄土高原土壤侵蚀抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 11~15.

编辑: 张绍付

## The critical conditions of erosion occur in red soil slope

HUANG Xuhua, CHEN Zheng

(Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** The relationship between sediment yield intensity of red soil slope erosion and runoff energy consumption was studied by using mobile rainfall erosion tank for flushing test, and the critical average runoff energy consumption of soil erosion was obtained. The results show that the slope runoff energy consumption is obtained by using the principle of energy conservation. With the same runoff energy consumption, the greater the slope, the greater the sediment yield intensity. Establish the relationship between slope sediment yield intensity ( $D_r$ ) and runoff energy consumption ( $\Delta E$ ), which has a good linear relationship:  $D_r = 6.3573 \Delta E - 55.339$ , which can be used to estimate slope sediment yield intensity; soil erosion has a certain critical runoff energy consumption. Within the scope of the experimental study, it can be obtained that the critical average runoff energy consumption of red soil slope erosion is 8.7J/min.

**Key words:** Erosion; Runoff energy consumption; Sediment yield intensity; Critical runoff energy consumption

翻译: 黄旭华