

坡面薄层径流最小侵蚀临界值及 主要影响因子研究

赵晓光 吴发启 王健
(西北农林科技大学 陕西杨陵 712100)

摘要: 通过8组坡度、5种水深及5种糙率情况下坡面薄层径流流态变化特征的实验研究, 得出薄层径流的临界雷诺数为1000, 对应的径流属层流时, 水深上限为3mm, 通过水深、糙率及坡度对雷诺数作用特征分析可知, 雷诺数与水深、坡度的变化成正比, 与糙率的变化成反比; 水深的作用明显大于后两者, 影响因子共同作用下, 雷诺数的变化规律可用公式 $Re = 2.331H^{1.41}n^{-0.973}S^{0.486} - 288.17$ 来描述。

关键词: 薄层径流 侵蚀 雷诺数

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2000)01-0030-03

Study on the Critical Value of the Thin Runoff and Law of Action by the Major Factors

ZHAO Xiao-guang WU Fa-qi WANG Jian

(Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry Yangling Shaanxi 712100)

Abstract Changes of the thin runoff flow in slopes depths and coarse degrees were discussed. The results showed that the critical value of Reynolds under 5° slope degree and 3 mm water depth when runoff flow was stratified. The value of Reynolds was directly proportional to water depths and slope degrees, but indirectly proportional to coarse degree. Effect of water degree on it largely exceeded others. A calculation formula of Reynolds value is as follows: $Re = 2.331 H^{1.41} n^{-0.973} S^{0.486} - 288.17$

Key words thin runoff flow erosion Reynolds value

黄土高原地区, 当坡地的土壤入渗率低于降雨强度时, 在坡面上就会形成薄层径流, 薄层径流在搬运坡面松散颗粒的同时, 还具有一定的冲刷能力, 这种搬运和冲刷能力的大小除与径流流量、流速关系密切外, 还取决于水流的流动形态, 即水流是层流还是紊流, 层流基本不产生侵蚀, 一旦水流由层流过渡到紊流, 其冲刷能力将大大增强, 土壤侵蚀量成倍增加, 因此, 对径流临界值的判定就变为对其流态的判定。

对于层流紊流的判断, 在水力学中是通过水流的雷诺数 Re 来判断的^[1], 明渠及天然河道中水流流态变化的临界值为雷诺数 Re 等于 500, 这个数值是否也适用于薄层径流, 再则, 根据计算雷诺数的公式:

$$Re = \frac{VR}{\gamma} \quad (1)$$

可知, 只有知道了薄层径流的流速 V , 水力半径 R 和运动黏滞系数 γ , 才能计算出雷诺数 Re , 而薄层径流的流速测定较困难, 因此, 找出薄层水流的临界雷诺数并研究其主要影响因子及变化规律, 进而寻求其计算方法就显得尤为重要。

1 实验设计

实验采用人工直接放水的方法模拟薄层水流, 避免了雨滴扰动的影响, 模拟设备为室内的径流槽, 槽的前部有消力池, 坡度可调节, 同时径流量通过阀门控制能直接调节水深。其投影长度 500 cm, 宽 50 cm, 槽深 15 cm 的矩形木槽, 在槽的末端有一堰口角度为 60° 的三角堰, 堰上设有一测针, 通过堰上水

* 收稿日期: 2000-01-01

国家“九五”重点科技攻关计划项目, 编号为 96-004-05-07。

头来控制流量。

根据以往的实验经验及实际情况分析^[2~4], 设计 3 个变量, 即水深 H 、坡度 S 、糙率 n 。水深 H 设计为: 3 mm、6 mm、9 mm、12 mm、15 mm 5 个水深; 坡度 S 为: 1°、2°、3°、4°、5°、8°、10°、12°、8 个坡度; 糙率 n 为 6 个, 即 0.007 3, 0.008 5, 0.010 8, 0.012 1, 0.016 6 和天然土坡面(糙率较大, 未测定)。

糙率的设定是通过不同粒径的砂石与水泥以 1 : 1 的方法混合而成的。沙子的选择是通过土壤筛选而得, 粒径分别为 < 0.03、0.03~0.09、0.09~0.125、0.125~0.25 mm。最小是径流槽光滑底面的糙率。

流速的测定用染色剂法, 该法的主要优点在于能同时观察到水流的流动形态, 在试验过程中用温度计来测量水温, 其值用来查出水的运动黏滞系数 ν 。因属宽浅水流, 水力半径 R 可近似的用水深 H 代替。

2 实验结果分析

2.1 临界雷诺数 R_{ek}

通过在薄层径流的起始端注入的染色剂, 观察流线的形状变化可知, 当坡面坡度从 1 变化到 5°;

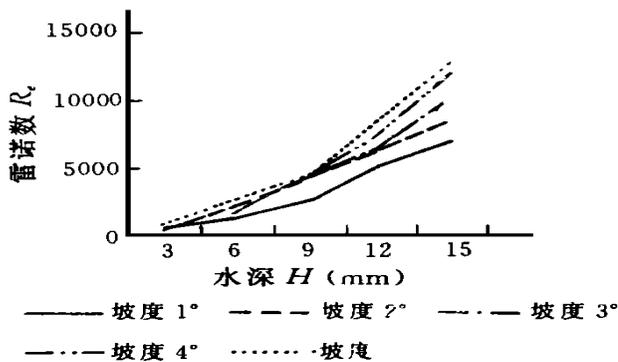


图 1 水深 H 与雷诺数 R_e 的关系图
 $n = 0.0166$

2.2 各因子对 R_e 的影响

从实验结果看, 所选的 3 个变量因子, 即坡度 S 、水深 H 和糙率 n 均对雷诺数 R_e 产生明显影响, 各因子的作用规律如下:

2.2.1 水深 H 的影响 图 1 是在糙率为 0.016 6 下, 坡度 S 不同时, 雷诺数 R_e 随水深变化的曲线图。从图 1 中能看到, 随水深的增加, 五条曲线均呈上升趋势, 而且当坡度变大时, 其曲线变陡, 因此, 说明雷诺数 R_e 随水深的增加而增大, 而且坡度越大, 其增大速率加快, 即雷诺数与水深呈正相关。

2.2.2 坡度的影响 图 2 是在固定糙率的条件下,

仅在水深为 3 mm 时, 染色剂流线呈微弯曲蛇形变化, 没有与水掺混, 其余水深情况下均发生掺混, 且糙率 n 愈小, 掺混愈强烈; 当坡度等于 8°、10°、12° 时, 水深即使为 3 mm 也全部发生掺混, 天然土坡面大糙率情况下也如此, 说明对坡面薄层径流而言, 3 mm 是其水深上限, 坡度 5 是一个关键点。在这种情况下其层流的雷诺数可见表 1。

表 1 层流时坡面薄层径流的雷诺数 (R_e) 值

坡度/ °	水温/ °C	水深/ mm	流速/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	糙率	雷诺数
1	20.0	3	34.78	0.0085	964
1	20.5	3	25.90	0.0108	753
2	20.0	3	32.36	0.0108	940
1	21.0	3	19.64	0.0121	557
2	20.5	3	28.50	0.0121	809
1	20.5	3	13.94	0.0166	386
2	20.0	3	18.11	0.0166	502
3	21.5	3	35.03	0.0166	971
4	21.5	3	35.27	0.0166	977
5	21.5	3	35.97	0.0166	997

考虑到坡度及水深因素共同作用, 薄层径流临界雷诺数 R_{ek} 为 997, 使用时可取 R_{ek} 为 1 000。

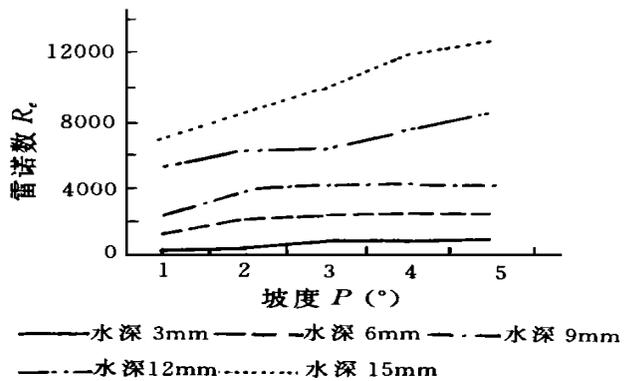


图 2 坡度 S 与雷诺数 R_e 的关系图
 $n = 0.0166$

雷诺数 R_e 随坡度 S 的变化而作出的关系图。从图 2 中可以看出, 五条曲线都呈现上升的趋势, 而且当水深变为 15 mm 时曲线变得更陡。因此雷诺数 R_e 随着坡度 S 的增大而增大, 且随着水深的增加其变化速率加大, 即雷诺数 R_e 与坡度 S 呈正相关。

2.2.3 糙率的影响 图 3 是在固定坡度, 不同的水深情况下, 其雷诺数 R_e 随糙率 n 的变化关系曲线图。从图上看, 五条曲线都呈下降的趋势, 并且水深越大, 其下降趋势就越厉害。因此, 雷诺数 R_e 随糙率 n 的增大而减小, 即雷诺数 R_e 与糙率呈反相关。

2.2.4 作用因子贡献分析 从以上的分析中, 我们

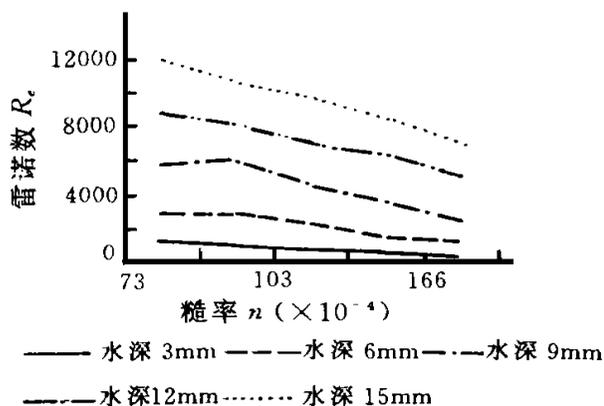


图 3 坡度 5 时糙率 n 与雷诺数 Re 的关系图

认识到雷诺数 Re 与坡度 S 和水深 H 呈正相关, 而与糙率 n 呈反相关。但是, 这三个因子对雷诺数的作用是否一致, 哪个因子的作用更大呢? 从上述的结果中分析可知, 糙率 n 为 0.008 5 时, 只有在坡度 S 为 1 时, 水深 3 mm 情况下, 薄层水流的流态才为层流; 当糙率 n 分别是 0.010 8, 0.012 1 时, 水深为 3 mm 的情况下, 坡度在 1 和 2 为层流; 当 n 增为 0.016 6 时, 坡度在 5 为层流。从这些结果的分析中可以看出: 水深对雷诺数 Re 的影响最大, 其次为糙率 n 和坡度 S 。

下面通过计算三个因子对雷诺数值贡献来验证(表 2)。

表 2 各因子贡献值分析

	水深	糙率	坡度
特征根	1.3651	1.0513	0.5837
变量解释 H	0.5856	-0.7034	0.4030
n	0.8528	0.0079	-0.5222
S	0.5430	0.7460	0.3855
贡献率	45.502	35.043	19.455

致谢: 原西北林学院水土保持系 99 届毕业生王健锋同学参与了实验工作, 在此表示感谢!

参考文献

- 1 成都科学技术大学水力学教研室 水力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979
- 2 吴普特, 周佩华 薄层水流流动型态及侵蚀搬运方式的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 20~ 24
- 3 刘秉正, 吴发启主编 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1997
- 4 吴发启, 赵晓光, 刘秉正等 地表糙度的量测方法及对坡面径流和侵蚀的影响[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(2): 15~ 19

从表 2 也可以清楚看到水深 H 作用最大, 糙率次之, 坡度相对较小, 由于自然坡面下糙率均较大, 因此, 坡度作用亦较明显。

2.3 雷诺数的计算

由上述分析已经知道了雷诺数受三个因子影响的变化规律, 经对实验所得 85 组有效数据的回归, 得到雷诺数 Re 与变量水深 H 、糙率 n 和坡度 S 的统计模型:

$$Re = 2.33H^{1.41}n^{-0.973}S^{0.487} - 288.17$$

式中: 水深 H 的单位为 mm, 坡度 S 的单位为度, 糙率 n 及雷诺数 Re 均无单位。

通过随机抽样方法进行检验, 误差率在 10% 之内, 且正负值分布合理, 说明公式的精度较高, 可以用来计算坡面薄层径流雷诺数, 用以判断径流侵蚀临界值。

3 结 论

判别坡面薄层径流流态的临界雷诺数值与判别河流等较大流体的临界值并不相同, 可用 1 000 作为临界值。

坡面薄层径流为层流的条件即径流无侵蚀的临界值是: 在坡面平整的情形下, 水深小于或等于 3 mm, 同时坡度 5 是一关键点。

水深 H 变化对雷诺数的影响最为显著, 其次为糙率 n 和坡度 S , 其共同作用规律可用统计式 $Re = 2.33H^{1.41}n^{-0.973}S^{0.486} - 288.17$ 描述。

土壤侵蚀与水土保持学报更名为水土保持学报

《水土保持学报》创刊于 1987 年, 由中国水土保持学会主办, 中科院水利部水土保持研究所承办, 是国内外公开发行的水土保持类学术期刊。因故于 1996 年重新申请登记为《土壤侵蚀与水土保持学报》, 1999 年又经科技部批准, 从 2000 年 1 月 1 日起更名为《水土保持学报》, 由中国科学院主管, 中科院水利部水土保持研究所主办, 科学出版社出版, 它是我国水土保持界具有影响的惟一学报刊物。