

黄河班多水电站工程区荒草地坡面径流形态试验研究

马春艳¹, 王占礼^{2,3}, 陆绍娟², 卜耀军¹, 李强¹

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 西北农林科技大学 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 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:雷诺数是坡面水流水力学重要参数之一, 阐明坡面水流雷诺数变化的特征将有助于从动力学角度认识坡面侵蚀过程的内在机制。采用野外人工放水试验方法, 对黄河班多水电站工程区荒草地坡面径流形态进行了试验研究, 结果表明: (1) 荒草地坡面水流形态判别指标雷诺数随供水过程的变化, 在不同供水流量及不同坡度下都随供水历时的增长而先增大后趋于稳定, 变化过程皆可用对数方程描述; (2) 荒草地坡面水流平均雷诺数随供水流量及坡度的增大而增大, 可分别用幂函数方程和指数方程描述, 随坡度及供水流量的变化可用二元幂函数方程描述; (3) 不同供水流量及不同坡度下, 荒草地坡面水流雷诺数均小于 500。次产流过程的坡面水流平均雷诺数变化为 86~339, 试验条件下工程区荒草地坡面水流形态均处于层流。

关键词:黄河班多水电站; 工程区; 荒草地; 水流形态; 雷诺数

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)04-0006-04

Experimental Study of Overland Flow Pattern in the Banduo Hydropower Station Project Area of the Yellow River

MA Chunyan¹, WANG Zhanli^{2,3}, LU Shaojuan², BU Yaojun¹, LI Qiang¹

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. State Key

Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Reynolds number is one of the important hydraulics parameters. Clarifying the variation of slope flow Reynolds number will help recognize the internal mechanism of slope erosion process from the point of dynamics. On waste grassland in the Banduo hydropower station project area of the Yellow River, the overland flow patterns are studied by artificial scouring experiment under different slope gradients and water supply discharge. The results show that: (1) the overland flow Reynolds number on the waste grassland, a Judging index of flow pattern, changes under different water supply discharges and different slopes rose first and stabilized finally, the logarithmic equation can be used to describe the process; (2) the average overland flow Reynolds number increased with increase of water supply discharge and slope gradients, which can be described by power function equation and exponential equation, respectively, and to both of the two factors, by a dual power function equation; (3) the overland flow Reynolds number on the waste grassland is less than 500 under different water supply discharge and different slopes. The average Reynolds number varies between 86 and 339, indicating that overland flow in waste grassland is laminar flow on the project area.

Keywords: Banduo hydropower station of Yellow River; project area; waste grassland; flow pattern; Reynolds number

收稿日期: 2015-11-15

修回日期: 2015-12-22

资助项目:国家自然科学基金项目“应用三区土盘试验解析黄土坡面片蚀动力学过程”(41471230);国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227);中国科学院重点项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03);陕西省科技厅农业攻关项目“生态修复植物引种利用研究与示范”(2014K01-12-03);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放项目(A314021402-1604);陕西省高校科协青年人才托举计划资助;陕西省高校科协青年人才托举计划(20150108);陕西省高校科协青年人才托举计划(20150108)

第一作者: 马春艳(1983—), 女, 陕西榆林人, 工程师, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持教学与研究。E-mail: nldmcy2004@163.com

通信作者: 王占礼(1960—), 男, 陕西榆林人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

工程建设对原生地面造成破坏、扰动及由此产生的水土流失已成为重要的环境问题及新的水土流失形式。然而,关于工程区水土流失的研究还很薄弱、滞后,严重制约着工程区侵蚀评价及工程区水土保持与生态建设的需求。因此加强工程区水土流失的研究对实际生产具有重要的指导意义。坡面水流水力学特征是造成地面土壤流失的直接动力因素,土壤流失的强烈程度与水流水力学特征密切相关。坡面径流雷诺数 Re 是坡面水流水力学重要特征之一,它是表征水流惯性力和粘性力的比值,是判断水流型态的重要指标。 $Re < 500$ 为层流, $500 < Re < 2\,000$ 为过渡区, $Re > 2\,000$ 为紊流区。目前关于坡面径流型态的研究借鉴水力学、河流动力学的原理和方法,已取得了一些研究成果^[1-12],但是大都局限于室内试验模拟,对坡面原状土径流型态的研究甚少,尤其是对工程区坡面原状土径流型态的研究还很薄弱。为此,本文在自然条件下采用野外人工放水试验方法,对黄河班多水电站工程区原始荒草地坡面径流型态进行试验研究,以促进对工程区及类似区荒草地坡面水流水力学性质及侵蚀动力学过程机理的深入认识,为工程区侵蚀评价及工程区水土保持与生态建设提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河班多水电站是黄河流域第2个梯级电站,坝址位于青海省海南州兴海县与同德县交界处的班多峡谷出口处。工程区属于青藏高原气候,多年平均降水量为 425.2 mm,植被类型大多为荒漠草原和山地草甸。土壤类型是青藏高原高山草甸土,有较明显的垂直地带性和地域性分布规律。其占地面积 171.89 hm²,原始地面包括荒草地、农地、河滩地、河滩盖沙地四类,其中荒草地面积最大,植被覆盖度均小于 30%。地面土石混杂、砾石含量高,其组成物质主要为第四纪沉积物。试验前期土壤含水量 12.5%,土壤容重 1.09 g/cm³。

1.2 试验设计与观测

在黄河班多水电站工程区荒草地上采用放水试验方法进行试验。试验小区由 1 mm 厚的钢板插入地面以下 0.15 m 围成,钢板高出地面 0.10 m,其投影面积为 4 m×0.5 m。对工程区进行实地调查情况后,选取荒草地的试验坡度为 4°,13°,22°,29°,37°,同一供水流量 10 L/min 条件下,5 场试验。供水流量分别为 4,6,8,10,12 L/min,同一坡度 22°条件下,5 场试验。每场试验供水历时 30 min。试验前用数码相机对试验荒草地坡面进行不同位置的垂直拍照,通

过在 Erdas Imagine 9.1 环境下分析处理确定其植被覆盖度,取得所有位置的植被覆盖度均小于 30%。

试验供水系统主要设备有水泵和溢流箱等。用汽车载水箱将水从水源地运至试验地,发电机带动水泵将水通过水管抽到溢流箱。通过安装在扬程水管出口的控制阀调节供水流量大小。为使流入小区的水流为均匀薄层状水流,在小区顶端的溢流箱嵌入地面,并与小区坡面刚好接触。

试验时荒草地坡面水流流速用高锰酸钾(K₂MnO₄)染色法测量,浑水温度用温度计法观测。试验过程中,在小区出口处定时计时收集浑水样进行水沙观测。开始产流时取样一次,产流后的前 6 min,分别每隔 1,2,3 min 取一次样,以后皆每隔 3 min 取一次样,试验结束时再取一次。用量筒测定浑水样体积,采用烘干法测定浑水样中的泥沙重量,经计算获得不同时刻产流的清水流量,结合观测得到的流速进一步计算出不同时刻的坡面水流平均水深。

在观测得到荒草地坡面水流流速、水深及浑水温度的基础上,计算出不同产流时刻的雷诺数,计算公式为:

$$Re = VR/\mu \quad (1)$$

式中: Re 表示雷诺数(无量纲); V 表示流速(m/s); R 表示水力半径(m), $R = hb/2h + b$, 其中, b 为水宽(m), h 为水深(m), 由于本研究的坡面水流属于薄层水流,水宽远远大于水深,故水力半径 R 直接用水深 h 代替; μ 为水流运动粘滞性系数(m²/s), $\mu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$, 其中, t 为水温(°C), μ 的单位为(cm²/s)。

2 结果与分析

2.1 荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的变化

2.1.1 不同供水流量下雷诺数随供水过程的变化

在相同投影坡长、坡度,不同供水流量条件下,荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的变化整体呈先增长后稳定的趋势(图1)。整个供水过程中,在开始产流后的 5 min 内,雷诺数随供水过程的变化较大,随径流历时增长迅速增大,随后变化较为平缓且基本呈直线。不同供水流量条件下的荒草地坡面产流过程中,雷诺数变化范围为 35~336,均小于 500,这表明水流型态一直处于层流状态。

经过对试验结果进行统计分析得出,不同供水流量条件下,荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的动态变化可用对数相关方程描述,经验方程及检验结果见表1。

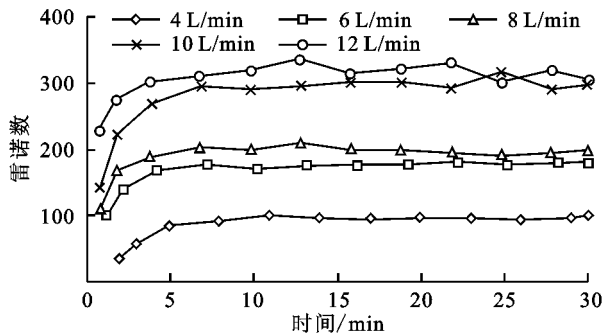


图 1 不同供水流量下坡面水流雷诺数随供水过程的变化

表 1 不同供水流量下坡面水流雷诺数随供水过程变化的经验方程

投影坡长/cm	坡度/(°)	供水流量/(L·min ⁻¹)	经验方程	相关系数
400	22	4	$Re=18.861\ln(t)+40.401$	0.8675
400	22	6	$Re=19.563\ln(t)+121.50$	0.8781
400	22	8	$Re=18.589\ln(t)+145.92$	0.8013
400	22	10	$Re=7.805\ln(t)+190.82$	0.8930
400	22	12	$Re=20.072\ln(t)+260.73$	0.8170

注:Re 为雷诺数,无量纲; t 为时间(min),下同。

坡面薄层水流雷诺数 Re 与水流流速、水深等有关。在试验进行过程中水流温度基本保持不变,坡面流速随供水历时呈先增大后趋于平缓的变化过程。同时随着供水过程的进行,坡面入渗率减小并趋于稳定,产流量也随之趋于稳定,水流深度随供水历时增长而逐渐趋于稳定,因此,雷诺数随径流历时增长先迅速增大后趋于稳定。

2.1.2 不同坡度下雷诺数随供水过程的变化 在相同投影坡长、供水流量,不同坡度条件下,荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的变化整体呈先增长后稳定的趋势(图 2)。整个供水过程中,在开始产流后的 5 min 内,雷诺数随供水过程的变化急剧增大,随后变化较为平缓且基本呈直线。产流 5 min 后不同坡度条件下雷诺数的变化趋势一致,而且几乎重叠在一起,只有最大坡度(37°)下的雷诺数变化过程线离各坡度下的过程重叠线较远。不同坡度条件下的荒草地坡面产流过程中,雷诺数变化范围为 59~369,均小于 500,这表明水流形态也一直处于层流状态。

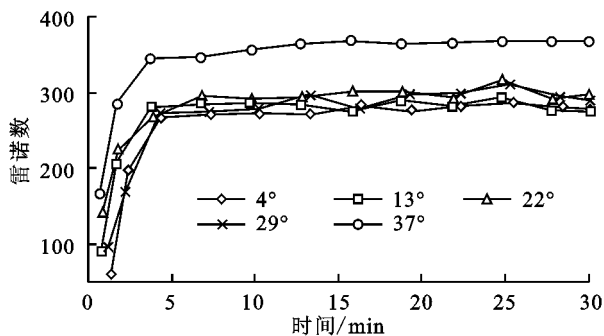


图 2 不同坡度下坡面水流雷诺数随供水过程的变化

经过对试验结果进行统计分析得出,不同坡度条件下,荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的动态变化皆可用对数相关方程描述,经验方程及检验结果见表 2。

表 2 不同坡度下坡面水流雷诺数随供水过程变化的经验方程

投影坡长/cm	供水流量/(L·min ⁻¹)	坡度/(°)	经验方程	相关系数
400	10	4	$Re=52.806\ln(t)+127.01$	0.8221
400	10	13	$Re=40.475\ln(t)+169.79$	0.8185
400	10	22	$Re=37.805\ln(t)+190.82$	0.8930
400	10	29	$Re=54.790\ln(t)+134.96$	0.8911
400	10	37	$Re=44.159\ln(t)+239.93$	0.8844

不同坡度条件下荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的变化与不同供水流量条件下水流雷诺数随供水过程的变化总体上具有相似性,都随供水历时的增长而先增大后转为平稳的变化趋势。其主要差异在于,在开始产流后的 5 min 内,不同坡度条件下雷诺数随径流历时增长的速率比不同供水流量条件下增长的速率大得多。

2.2 供水流量对荒草地坡面水流雷诺数的影响

荒草地坡面水流平均雷诺数随供水流量的增大而增大(图 3)。同坡度不同供水流量条件下,次产流过程的坡面水流平均雷诺数变化为 86~305,皆小于 500,按照水流形态的划分标准,表明试验条件下荒草地坡面水流形态是层流。通过对试验结果进行分析可知,荒草地坡面水流平均雷诺数随供水流量的变化可用幂函数相关方程描述,其经验方程为:

$$Re=19.224Q^{1.1332} \quad (R=0.9832) \quad (2)$$

式中:Re 表示平均雷诺数,无量纲; Q 表示供水流量(L/min)。

同坡度条件下,随着供水流量的增大,坡面水深及流速皆增大,所以,水流平均雷诺数必然增大。

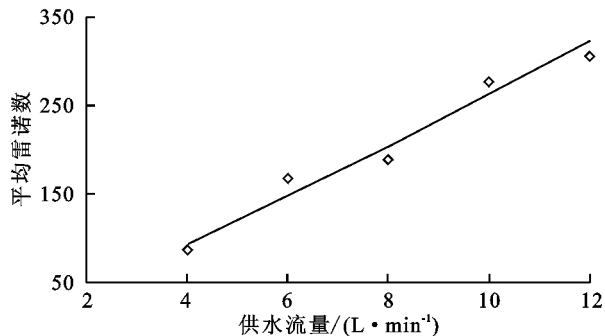


图 3 供水流量对坡面水流雷诺数的影响

2.3 坡度对荒草地坡面水流雷诺数的影响

荒草地坡面水流平均雷诺数随坡度的增大而增大(图 4)。同供水流量不同坡度条件下,坡面次产流过程的水流平均雷诺数变化为 252~339,也皆小于

500,按照水流型态的划分标准,表明荒草地坡面水流型态也处于层流状态。通过对试验结果进行相关分析,水流平均雷诺数随坡度的变化可用指数相关方程来描述,其经验方程为:

$$Re = 237.47e^{0.0073S} \quad (R=0.8012) \quad (3)$$

式中:Re表示平均雷诺数,无量纲;S表示坡度(°)。

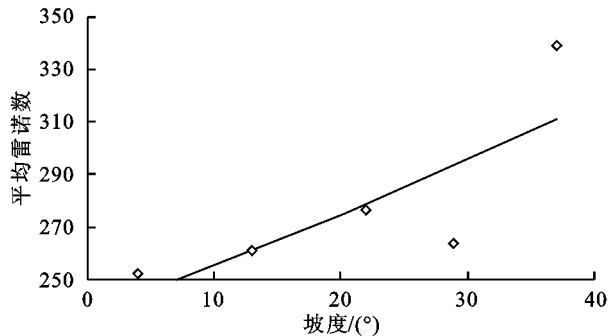


图4 坡度对坡面水流雷诺数的影响

同供水流量条件下,随着坡度的增大,坡面水深减小,流速增大,但水深减小对雷诺数的减小作用小于流速增大对雷诺数的增加作用,所以,水流平均雷诺数随坡度的增大而增加。

2.4 供水流量及坡度对荒草地坡面水流雷诺数的影响

通过对不同供水流量、坡度条件下的全部试验观测数据进行多元回归分析,得出二因子综合作用描述方程为:

$$Re = 426.2477S^{0.0764}Q^{1.1937}$$

$$(R=0.973; F=62.1491 > F_{0.01}(2,7) \approx 9.55) \quad (4)$$

模拟与检验结果表明,荒草地坡面水流平均雷诺数随坡度、供水流量的动态变化可用二元幂函数方程描述,且相关关系高度显著。式(4)表明,供水流量对雷诺数的影响大于坡度的影响,这与前面提到的有关学者^[11-12]的研究结果基本一致。

3 结论

(1) 荒草地坡面水流雷诺数随供水过程的变化在不同供水流量及不同坡度下皆随供水历时的增长先快速增大随后转为平稳的变化趋势,变化过程皆可用对数相关方程描述。其主要差异在于,开始产流后5 min内,不同坡度下雷诺数随径流历时增长的速率比不同供水流量下增长的速率大得多。此外,各坡度下的雷诺数差异较小,变化过程线几乎交叠在一起,

只有最大坡度(37°)下的过程线与各坡度下的过程交叠线较远;

(2) 荒草地坡面水流平均雷诺数随供水流量及坡度的增大而增大,可分别用幂函数方程和指数方程描述;荒草地坡面水流平均雷诺数随坡度、供水流量的变化可用二元幂函数方程描述,供水流量对雷诺数的影响大于坡度的影响;

(3) 在不同供水流量及不同坡度下,次产流过程的坡面水流平均雷诺数变化为86~339。荒草地坡面水流雷诺数小于500,表明试验条件下工程区荒草地坡面水流型态均为层流。

参考文献:

- [1] Bunte K, Poesen J W. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of non cohesive sediment by shallow overland flow [J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1415-1424.
- [2] Poesen J W, Vandaele K, Wesemael B V. Gully erosion: importance and model implications, modeling soil erosion by water [J]. NATO ASI Series, 1998, 155: 285-311.
- [3] Olson K R, Laflen J M, Norton L D. Evaluation of methods to study soil erosion-productivity relationships [J]. J. Soil and Water Cons., 1994, 49(6): 586-590.
- [4] 刘国彬,张光辉. 原状土冲刷法与人工模拟降雨法研究土壤抗冲性对比分析[J]. 水土保持通报, 1996, 16(2): 32-37.
- [5] 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5-7.
- [6] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特性的研究[J]. 泥沙研究, 1999(1): 56-61.
- [7] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 23-25.
- [8] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. 泥沙研究, 2002(4): 69-74.
- [9] 张光辉,卫海燕,刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 58-61.
- [10] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75.
- [11] 丁文峰,李占斌,鲁克新. 黄土坡面细沟侵蚀发生的临界条件[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 551-555.
- [12] 白清俊,沙际德. 黄土坡面细沟流流态的试验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 26-29.