

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180154

砒砂岩风化物坡面水力侵蚀影响因素探究

张 赢, 李晓丽, 常 平, 郭雄敏, 邬尚贇

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:深入理解降雨产生的坡面流的水动力学特性与砒砂岩侵蚀的关系是研究鄂尔多斯红色砒砂岩侵蚀机理的基础。采用降雨模拟系统进行不同雨强和坡度下降雨侵蚀试验,研究了水动力学参数与砒砂岩风化物侵蚀量的关系。结果表明:侵蚀量随坡度和雨强的增大均呈指数型增大;灰色关联分析下各水动力学参数与侵蚀量的关联度值在 0.685~0.733 之间,其中水流功率的关联度最高;以水动力学参数为变量,利用赤池信息量准则编程得到侵蚀量预测模型。综合灰色关联分析和赤池信息量准则都表明水流功率是影响鄂尔多斯砒砂岩风化物侵蚀产沙的重要参数。

关键词:坡面侵蚀;砒砂岩风化物;模拟降雨;灰色关联分析;赤池信息量准则

中图分类号:S157 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2019)05-0014-05

砒砂岩侵蚀在我国西北、华北等地较为严重,特别是在鄂尔多斯丘陵区砒砂岩侵蚀问题特别突出,当地沟壑纵横,表层 10~14cm 主要为白垩、侏罗系砂岩,由于其胶结力差,遇水如泥,且当地暴雨集中、强度大,造成该区域侵蚀类型为水蚀为主的复合侵蚀,土壤侵蚀模数高达 $(3\sim 4)\times 10^4 t/(a\cdot km^2)^{[1-2]}$ 。该类型的复合侵蚀使沟底及河滩等处沉积大量砒砂岩风化物,形成表层为松散砒砂岩风化物的坡面,其结构松散,随降雨极易饱和,受水作用更明显,造成砒砂岩风化物被大量冲刷,水土流失严重。

降雨径流和坡度作为水蚀动力的主要来源,国内外已经开展了大量坡面侵蚀试验研究,Wang 等^[3]研究了降雨条件下不同坡度、不同雨强、不同坡长的输沙率,认为雨滴对分离土壤和泥沙运输起到双重作用;Ali Reza Vaezi 等^[4]通过对半干旱地区原状坡面的模拟降雨试验研究了雨滴对坡面侵蚀的影响,发现在较低雨强下(20mm/h~30mm/h)雨滴冲击是控制坡面土壤流失的主要因素,而随雨强的增大,由于径流深度的增大,雨滴对土壤流失的贡献率逐渐降低;郝好鑫等^[5]研究了降雨和径流共同作用下不同坡度的红壤坡面的

侵蚀,综合各侵蚀阶段考虑水流功率是描述土壤侵蚀的最优参数。对于砒砂岩坡面侵蚀的研究,杨吉山等^[6]进行了对原状坡面的冲刷试验,认为水流剪切力、流速、单位水流功率、流量、雷诺数与土壤剥蚀率的相关系数在 0.793~0.900 之间,相关性最大的是单位水流功率。郭忠录等^[7]认为针对第四纪粘土发育红壤坡面,水流功率和雷诺数是描述产沙速率的最优水力学参数。

由于坡面侵蚀研究有很强的环境限制,成果难推广,结合当地环境特点,本文以松散砒砂岩饱和土为对象,研究砒砂岩风化物在降雨条件下迅速饱和形成的坡面的产沙规律及坡面薄层水流水力学参数的变化规律,以期对鄂尔多斯砒砂岩地区的土壤侵蚀提供治理依据。

1 试验方法

1.1 试验仪器

本试验在水利部牧区科学研究所进行,采用降雨器降雨,降雨有效高度 4m,均匀度大于 80%。试验土槽(见图 1)长 2m,宽 0.15m,高 0.3m,槽底隔 10cm 设置一个 1cm 直径的小孔,底部均匀铺设 5cm 厚天然砂。

收稿日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金项目“鄂尔多斯丘陵区砒砂岩水蚀动力学机理研究”(41561061)

作者简介:张赢(1992-),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事岩土环境力学研究。E-mail:874257966@qq.com

通讯作者:李晓丽(1969-),女,内蒙古赤峰人,教授,博士,主要从事岩土环境工程及结构工程方面研究。E-mail: nd-lxl@163.com



图1 试验土槽
Fig.1 The test sink

1.2 土样采集处理

土样于2017年6月采于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗的圪坨店沟试验区,其粒径组成见表1。将土过10mm筛,分3次均匀倒入试验槽中,每次填土厚度为5cm,刮平并将土按压至相应刻度线。填土质量根据用土的天然密度进行换算。

1.3 试验方案

根据准格尔旗30年的气象信息,在30~110mm/h范围内等间距设置5个雨强,试验时间每次20min。根据实地调查,设计坡度定为7.5°、10°、12.5°、15°、17.5°。试验前进行预降雨使坡面饱和,然后调节至试验雨强进行试验,坡面产流通过出水口处时记时,并每2min接一个水沙样本,用烘干法测定泥沙质量;接水沙样本的同时用高锰酸钾染色法测水流速度;同时在槽的上中下部分旁分别测量雨强,用温度计测雨水样本的温度。试验结束后,将表层土根据实际情况铲除,通过称重换算得出需要补土的质量。补土完毕静置24h进行下一次试验。

1.4 各水力要素分析

表层流速由坡长和秒表记录的高锰酸钾溶液在坡上流动的时间推算所得,共10组数据,因坡面无明显沟蚀,薄层水流不汇流,流速变化不大,故剔除个别误差较大的数据后取其均值为试验过程中的表层流速数据,而平均流速由下式求得:

$$V = \frac{\alpha V_s}{100} \quad (1)$$

式中: V 为平均流速,m/s; V_s 为表层流速均值,cm/s; α 为折减系数。

关于 α 的取值,传统上根据流态的不同取值在0.5~0.8^[8-9],而张宽地等^[10]用定床阻力试验得出坡面薄层水流在滚波区的 α 取值在0.25~0.35,考虑本试验是在降雨条件下进行,由于雨滴的打击,其值应略大于无降雨条件下的 α 值,取0.4。

采用换算法计算平均水深:

$$h = \frac{10^{-6}Q}{VB} \quad (2)$$

$$Q = \frac{(M_1 - M_2 - M_3)}{\rho T} \quad (3)$$

式中: h 为平均水深,m; Q 为出水口流量,cm³/s; B 为槽宽,m; M_1 为沙样总重,g; M_2 为干沙重(侵蚀量),g; M_3 为量筒重,g; ρ 为水密度,g/cm³; T 为试验时间,s。

雷诺数: $Re = \frac{VR}{\nu} \quad (4)$

$$\nu = 0.01775(1 + 0.0337t + 0.000221t^2) \quad (5)$$

式中: V 为水流速,m/s; R 为水力半径,m,在坡面流中 $R=h$; ν 为水流运动粘滞系数,m²/s; t 为水温,℃。

弗如德数: $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (6)$

水流剪切力: $\tau = \gamma_0 R J \quad (7)$

式中: γ_0 为水的重度,N/m³; J 为能坡, $J = \sin\theta$, θ 为坡面坡度。

水流功率: $W = \tau \cdot V \quad (8)$

2 结果与分析

2.1 雨强和坡度对侵蚀量的影响

由图2可知,各坡度下,侵蚀量随着雨强的增大均呈指数增大,相关系数均在0.93以上。当雨强在80~95mm/h之间变化时,数据图都存在一个较明显的拐点,随着坡度的增大拐点会略向雨强小的方向移动。究其原因,根据马廷等^[11]的推导,雨强增大,雨滴动能呈幂函数增大,导致垂直坡面方向造成雨滴击溅的能量增大,土颗粒更易被击溅分离,同时顺坡面方向的能量使表层土颗粒更易被冲刷;而且雨强决定了坡

表1 砒砂岩的粒径组成
Table1 The particle size composition of the Pisha sandstone

d/mm	d<0.100	0.100≤d<0.250	0.250≤d<0.375	0.375≤d<0.500	0.500≤d<0.750	0.750≤d<1.000	d≥1.000
百分比/%	15.83	50.90	16.53	5.40	8.85	1.75	0.74

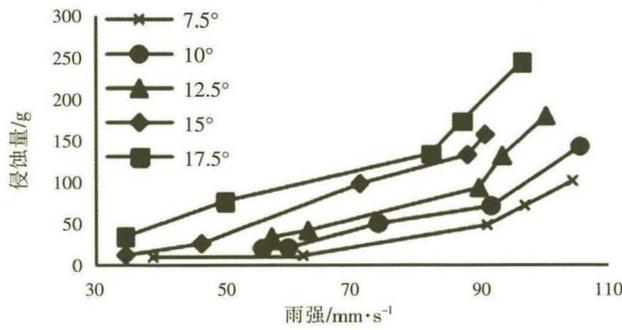


图2 一定坡度下侵蚀量随雨强的变化
Fig.2 The changes of erosion with rainfall intensity under certain gradient

形成较为稳定的充斥坡面的薄层水流,雨强越大流量越大,流速就越大。

面流量的大小,随雨强的增大坡面流量增大,随即挟沙能力增大。坡度和侵蚀量的关系如图3所示,相同雨强下,侵蚀量随坡度的增长呈指数型增长, R^2 均达到0.90以上。由于是细长型的缓坡面,最大坡度 17.5° 和最小坡度 7.5° 的有效承雨面积之差只有 $0.01m^2$,由坡度增加造成承雨面积减小而带来的影响可忽略。而随坡度的增加顺坡方向的雨滴能量增大,表面颗粒由于重力和雨滴动能的双重作用更易被向下坡方向击溅分离,并且坡度的增长提高了水流的剪切能力,从而侵蚀量增大。

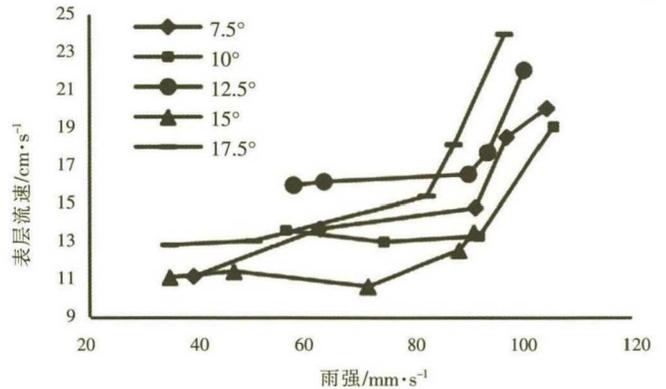


图4 不同坡度下表层流速随雨强的变化
Fig.4 The changes of surface velocity with rainfall intensity under certain gradient

2.2.2 雷诺数与弗如德数

水流流态是坡面水沙二相流的宏观表征,而雷诺数和弗如德数是共同表征水流流态的两个基本水动力学参数。 Re 小于 500 为层流,大于 2000 为紊流。 Fr 是判断急流或缓流的依据, Fr 大于 1 为急流,小于 1 为缓流,等于 1 为临界流。对于雷诺数从表 2 可看出,各坡度下雷诺数均随雨强的增大而增大,而坡度对其影响不明显。并且雷诺数较小,均属于层流,原因是降雨形成的水流层薄水力半径小,且水流因挟沙在缓坡面流速缓。弗如德数如表 2 所示,可知水流基本属于缓流。

综上可知,水流基本处在“层流-缓流区”。

2.2.3 水流剪切力和水流功率

从表 2 可知,各坡度下径流剪切力随着雨强均呈现一个先升高后小幅降低的趋势,峰值出现在 85~95mm/h。这是因为随着雨强的增大,供水量增多,水深和水力半径增大,在同坡度下,水力半径决定了剪切力的大小,所以剪切力随雨强的增大而增大。而由图 4 已知,流速在 90mm/h 雨强左右出现拐点,由于超过 90mm/h 流速增长很快,降雨水量增幅小于水流流出水量的增幅,使坡面水流水深和水力半径实际会随雨强的增大而缓慢变小,从而水流剪切力缓慢变小。由表 2 知水流功率和雨强基本呈线性关系,这是因为结合公式(2)(7)(8)得出水流功率只与流量和坡度有关,而本试验过程中由于砒砂岩坡面饱和且主要为面蚀无发育的细沟,流量和雨强是成正比的,所以水流功率随雨强增加而线性增加。

2.3 各水力学参数与侵蚀量的关系

为了研究各水力学参数与侵蚀量的相关性,现利

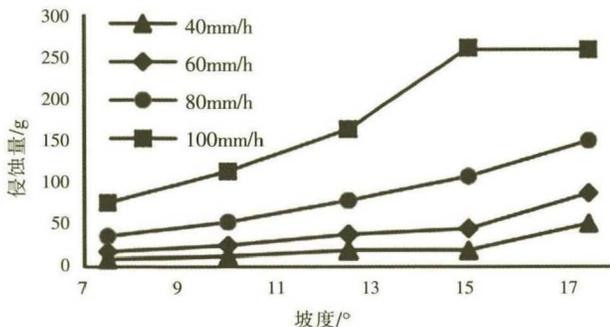


图3 一定雨强下侵蚀量随坡度的变化
Fig.3 The changes of erosion with slope under certain rainfall intensity

2.2 坡度和雨强对各水力学参数的影响

2.2.1 表层流速随雨强的关系

从图 4 可看出,随着雨强和坡度的增大,流速增大,此外各个坡度上流速均在雨强 90mm/h 左右出现拐点,拐点之前流速改变有增有减且改变速度不很明显,拐点过后流速迅速增大。分析原因是整个侵蚀过程处在面蚀阶段,特别在较低雨强下,由于流量不足,水流不汇集因而深度很小,紧贴于坡面的薄层水流没有完全充斥坡面,比起雨滴的加速作用更多是受坡度影响缓慢流动,又由于水流轨迹的随机性,致使流速随雨强变化不大。当雨强达到 90mm/h 左右以后,由于可以

表2 各水动力学参数随坡度雨强的变化关系
Table2 The relationship of dynamic hydraulics parameters with slope and rainfall intensity

坡度/ $^{\circ}$	雨强/ $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	雷诺数	弗如德数	水流剪切力/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	水流功率/ $\text{N}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$
7.5	39.1	27.11	0.60	0.71	0.03
7.5	62.4	47.83	0.65	0.92	0.05
7.5	91.2	62.36	0.60	1.25	0.07
7.5	97.0	68.85	0.82	1.05	0.08
7.5	104.5	72.07	0.89	1.05	0.08
10	56.1	39.35	0.68	1.11	0.06
10	60.0	37.42	1.21	0.79	0.06
10	74.2	51.90	0.55	1.54	0.08
10	91.9	65.60	0.51	1.86	0.10
10	105.7	67.03	0.82	1.49	0.11
12.5	57.5	39.77	0.85	1.21	0.08
12.5	63.22	46.21	0.83	1.31	0.08
12.5	89.9	58.46	0.72	1.82	0.12
12.5	93.5	69.49	0.78	1.77	0.13
12.5	100.3	71.08	1.05	1.52	0.13
15	34.8	27.28	0.63	1.26	0.06
15	46.6	31.88	0.57	1.64	0.07
15	71.3	48.46	0.42	2.69	0.11
15	88.1	65.41	0.48	2.82	0.14
15	90.9	61.66	0.53	2.70	0.15
17.5	34.7	24.72	0.79	1.26	0.06
17.5	50.2	38.86	0.67	1.79	0.09
17.5	82.3	39.68	0.67	2.49	0.15
17.5	87.2	59.06	0.84	2.24	0.16
17.5	96.6	61.73	1.21	1.88	0.18

用灰色关联分析法对其进行分析。

灰色关联分析法是通过灰色关联度来确定系统因素间的响应程度或者对系统主行为的贡献程度的一种方法,关联度越大则相关程度或对系统主行为的贡献程度越大。

本文选择侵蚀量为参考数列,平均流速、雨强、水流剪切力、坡度和水流功率为比较数列,计算各参数与侵蚀量的关联度。

结果如表3所示,可知各水动力学参数与侵蚀量的关联度均较高,其中水流功率与侵蚀量的关联度最高。但由表3可见,各水力学参数对侵蚀量的影响差别不是特别明显,而且有学者认为反映坡面侵蚀的因素并不单一,用几个水力学参数进行综合考量更为合适。

表3 各水力学参数与侵蚀量的关联度
Table3 The correlation between the hydraulic parameters and erosion amount

水力学参数	平均流速	雨强	水流剪切力	坡度	水流功率
关联度	0.685	0.697	0.708	0.692	0.733

所以现用 r 语言编程,利用赤池信息量准则,找出最简洁且能对与侵蚀量的关系给出最好解释的水力学参数的线性组合,并利用公式(9)对侵蚀量进行预测。

赤池信息量准则(AIC)是衡量拟合优良性的一种标准,其建立在熵概念的基础上,可以权衡所估计模型的复杂程度和此模型拟合数据的优良性^[12]。AIC 可以表示为: $AIC = (-2)\ln(\text{模型的似然函数}) + 2(\text{模型的独立参数个体})$ 。为了避免过度拟合,一般选 AIC 值最小的那组拟合函数。

将表3五个水力学参数和其对应的侵蚀量的25组数据随机分成训练组(18组)和预测组(7组)两部分,带入程序得 AIC 最小的拟合方程为:

$$M_2 = -76.36 + 1221.87W + 0.58I \quad (9)$$

式中: M_2 为侵蚀量; W 为水流功率; I 为雨强。其中相关系数 R^2 为 0.9257, P-value 为 2.243×10^{-6} , 可知差异极显著且拟合精度很高。

在此角度可见水流功率和雨强的组合对侵蚀量有显著影响且拟合效果最好,把预测组的7组雨强和水流功率数据带入公式(9)得到7个侵蚀量预测值,图5为侵蚀量预测值和实测值的关系图,可以看出点基本在 $y=x$ 附近,预测值与实测值的平均误差为 10.6%,说明此线性组合能较好对侵蚀量进行拟合和预测。

综合灰色关联分析和拟合公式,均说明水流功率是描述砒砂岩风化物侵蚀最重要的水动力学参数。

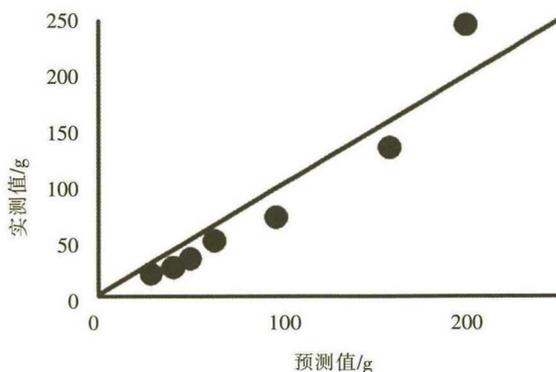


图5 侵蚀量实测值与预测值关系
Fig.5 The relationship between the observed and predicted erosion amount

3 结论

(1)砒砂岩风化物坡面的侵蚀量随雨强和坡度的增长均呈指数增长,雷诺数和水流功率随雨强的增大而增大,流速变化过程是雨强 0~80mm/h 时变化幅度

不明显,85mm/h 以上增长迅速。径流剪切力有随雨强的增加先上升后小幅下降的趋势,拐点基本在雨强为90mm/h 左右。根据雷诺数与弗如德数的规律,认为坡面流流态基本处于“层流-缓流区”。

(2)坡度、雨强、平均流速、水流剪切力、水流功率均与鄂尔多斯砒砂岩风化物坡面侵蚀产沙有较高的关联度,其中水流功率关联度最高;水流功率和雨强的线性组合可以很好的拟合和预测砒砂岩风化物的侵蚀量,综合赤池信息量准则得出的公式和灰色关联法可看出水流功率是描述降雨条件下鄂尔多斯砒砂岩风化物侵蚀的最重要指标。

参考文献:

- [1] 张喜旺,秦奋. 砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J]. 地理研究, 2016,35(3):513-524. (ZHANG Xi wang, QIN Fen. Coupling relationship of precipitation and vegetation and its influence for sediment yield in Pisha sandstone area [J]. Geographical Research, 2016,35(3):513-524. (in Chinese))
- [2] 冷元宝,姚文艺. 砒砂岩特征及其资源利用 [J]. 中国水利, 2015, (8): 15-17.(LENG Yuanbao, YAO Wenyi. Features and utilization of arsenic sandstone[J]. China Water Resources, 2015,(8):15-17. (in Chinese))
- [3] Zhang X C, Wang Z L. Interrill soil erosion processes on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2017,548:652-664.
- [4] Vaezi A R,Ahmadi M, Artemi C. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls[J]. Science of The Total Environment, 2017,583:382-392.
- [5] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2017,33(8):134-140. (HAO Haoxin, GUO Zhonglu, WANG Xianzhou, et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(8):134-140. (in Chinese))
- [6] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等. 原状砒砂岩坡面产流产沙规律试验研究[J]. 人民黄河, 2017,39(1):98-101+109. (YANG Jishan, YAO Wenyi, ZHENG Mingguo, et al. Experimental study on runoff production and sediment yield process on the undisturbed sandstone slopes[J]. Yellow River, 2017,39(1):98-101+109. (in Chinese))
- [7] 郭忠录,马美景,蔡崇法,等. 模拟降雨径流作用下红壤坡面侵蚀水动力学机制[J]. 长江流域资源与环境, 2017,26(1):150-157. (GUO Zhonglu, MA Jing, CAI Chongfa, et al. Soil erosion and flow hydraulic on red soil slope under simulated rainfall/runoff [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017,26(1):150-157. (in Chinese))
- [8] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的试验研究 [J]. 水科学进展, 2002,13(2):159-165. (ZHANG Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science, 2002,13(2): 159-165. (in Chinese))
- [9] 潘成忠,上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009,17(6):843-851. (PAN Chengzhong, SHANGGUAN Zhouping. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009,17(6):843-851. (in Chinese))
- [10] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等. 坡面浅层明流流态界定方法之商榷[J]. 试验流体力学, 2011,25(4):67-73. (ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, LU Hongxing, et al. Discussion on flow pattern determination method of shallow flow on slope surface [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011,25(4):67-73.(in Chinese))
- [11] 马廷,周成虎. 基于雨滴谱函数的降雨动能理论计算模型[J]. 自然科学进展, 2006,16(10):1251-1256. (MA Ting, ZHOU Chenghu. Theoretical calculation model of rainfall kinetic energy based on raindrop spectral function[J]. Progress in Natural Science, 2006,16(10):1251-1256.(in Chinese))
- [12] 刘璋温. 赤池信息量准则 AIC 及其意义 [J]. 数学的实践与认识, 1980,(3):64-72. (LIU Zhangwen. Akaike information criterion (AIC) and its significance [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 1980,(3):64-72. (in Chinese))

Influencing Factors of Hydraulic Erosion on Weathered Pisha Sandstone Slope

ZHANG Ying, LI Xiaoli, CHANG Ping, GUO Luomin, WU Shangyun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: A thorough understanding of the relationship between the erosion of Pisha sandstone and the characteristics of flow hydraulics rainfall induced is the basis for studying the erosion mechanism of red Pisha sandstone in Erdos. Rainfall simulation system was subjected to the designed rainfall intensities and gradients to carry out the tests. Through the tests, the relation between the hydrodynamic parameters and erosion amount of weathered Pisha sandstone was studied. The results suggest that erosion amount has an exponential growth as either rainfall intensity or gradient increases. The correlation degree between each hydrodynamic parameter and erosion amount under grey correlation analysis is between 0.685 and 0.733. The highest value is the correlation between stream power and erosion amount. Using the hydrodynamic parameter as a variable, the prediction model formula was programmed according to the Akaike information criterion. The grey relational analysis and Akaike information criterion all indicate that stream power of the water flow is an important parameter that affects the erosion and sediment yield of weathered Pisha sandstone in Erdos.

Key words: hillslope erosion; weathered Pisha sandstone; simulated rainfall; grey correlation analysis; Akaike information criterion