

模拟降雨侵蚀产沙量与其影响因子的灰关联分析

管新建¹, 张文鸽², 李 勉², 申震洲²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450002; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘 要: 在 20° 和 25° 坡度上, 选用 4 种雨强条件进行人工模拟降雨实验, 对土壤水蚀动力过程进行了系统模拟, 并运用灰色关联度的分析方法, 研究了坡面侵蚀产沙量与其影响因子之间的关联程度。研究结果表明, 在实验条件下, 雨强与坡面降雨径流产沙量的关联度最大, 水流功率次之, 可以用雨强和水流功率来描述坡面径流产沙量, 并建立了坡面径流产沙量与雨强和水流功率的相关关系式。

关键词: 模拟降雨; 影响因子; 灰色关联

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0168-04

中图分类号: S157

GCA Between Sediment Yield and Its Impact Factors Under Simulated Rainfall Conditions

GUAN Xin-jian¹, ZHANG Wen-ge², LI Mian², SHENG Zhen-zhou²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450002, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: The hydrodynamic process of soil water erosion was systemically simulated in the study by artificial precipitation experiments with treatments of two slopes (20° and 25°) and four rainfall intensities. The relationship between sediment yield and its impact factors was also studied using gray correlation analysis. The results show that rainfall intensity had the highest correlation coefficient with surface erosion sediment yield. Stream power was the factor with the second highest coefficient. Surface erosion sediment yield was therefore described by rainfall intensity and stream power with established regression equation.

Keywords: artificial precipitation; impacting factors; gray correlation analysis (GCA)

水土流失是当今世界普遍关注的重大环境问题^[1], 尤其是在广大的发展中国家, 由土壤侵蚀导致的严重水土流失已成为农业经济发展的主要障碍和生态环境建设面临的主要问题。土壤侵蚀是自然界物质运动方式之一, 是侵蚀力作功的过程, 也是与抵抗力交换的过程, 往往造成各种因素间的相互作用和循环, 归属于地质大循环的范畴。影响土壤侵蚀的因素复杂众多, 有自然因素, 如气候、地形、地质、土壤、植被等, 还有社会、经济因素。对于坡面侵蚀产沙而言, 同样受气候、土壤、地质地貌、植被等多种因素的影响, 导致侵蚀产沙影响因子的复杂性^[2-3], 本研究通过在降雨条件下进行单一坡面上的模拟降雨实验, 在不考虑植被等其它因素的影响前提下, 主要选择坡面降雨条件下的一些水力参数及土壤状况来研究对坡面侵蚀产沙的影响, 所以所选因子有雨强、坡度、土壤容重、流速、剪切力、水流功率、单位水流功率、佛汝德

数、阻力系数等影响因子。对于这些因子来说, 究竟哪些影响因子对坡面降雨侵蚀产沙所做的贡献最大, 还没有得到统一的认识, 需做进一步的深入研究。因此, 本研究的目的是在降雨径流条件下, 利用坡面径流小区实验, 运用灰色关联度理论, 对坡面侵蚀产沙量与其影响因子进行灰色关联度计算和分析, 探究影响坡面侵蚀产沙的主要影响因子, 研究结论对建立土壤侵蚀过程模型, 具有重要的理论和实践意义。

1 实验设计及方法

对于水流剪切力、水流功率、单位水流功率、佛汝德数和阻力系数是通过实验测得一些基础数据, 根据各自的公式计算得到。所以为了获得这些数据, 必须进行一系列的实验。

实验在郑州市北郊模型黄河试验基地进行, 径流小区面积为 1.5 m × 5 m, 下垫面均为裸坡。坡度为

20°和 25°,降雨强度均为 0.3, 0.6, 0.9 和 1.2 mm/min,降雨历时均为 30 min。进行室内实验时,为了保证每次实验的初始条件基本一致,先将土槽底部填入 0.2 m 厚的细沙,保持沙层表面平整,在沙层上面铺上纱布,以便将沙层和填在上面的土层分开;将过筛后的土分层填入两个土槽中,边填边用力压实,注意各层之间结合良好,避免分层现象,填土深度为 40~50 cm,实验用黄土为郑州市邙山附近农地表层黄土,黄土的各级粒径组成详见表 1;填料结束后,将坡面整平以保证每次实验其边界条件基本一致,由于本实验的土壤容重是一个影响因子,所以实验时采取了不同的土壤容重,每次实验前,在坡面上、中、下部各等距离选择 2 个点取样,并用烘干法和环刀法分别测定其不同深度(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm)的土壤前期含水量及土壤容重,使干容重控制在所要求的容重范围内。实验开始前先在坡面

洒水使坡面饱和,实验开始后,仔细观察坡面产流发生时间,在土槽出口处每两分钟接取 1 个径流泥沙样,每次实验后,用量筒测定各个样品的体积,用置换法测定各个样品的泥沙量,取样的同时采用染料示踪法测定坡面径流流速。由于所测得的流速为径流表面的最大流速,要得到平均流速,必须根据径流流态进行换算,首先根据雷诺数判断是紊流、过渡流还是层流,然后分别乘以换算系数 0.8,0.7 和 0.67;由于每个断面测 3 次,需取 3 次的平均值,这样就可以得到平均流速。每 2 min 用薄钢尺在 12 个固定位置量测坡面径流宽度,然后在土槽 2,重复实验一次,两次实验的最大误差控制在 20% 以内,如果超过 20%,重新再做,直至满足要求,然后取两次实验的平均值作为实验数据。用测定的平均水深、平均流速、坡度和泥沙量计算每次实验时的水流剪切力、水流功率、单位水流功率、弗汝德数和阻力系数等水力因子。

表 1 实验用黄土的粒径组成

土类	粒径范围/mm						
	>1.0	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
邙山黄土	0	1.05%	35.45%	43.4%	3.2%	6.4%	10.5%

2 灰色关联分析的基本原理

灰色关联^[4]是指事物之间的不确定关联,或系统因子之间、因子对主行为之间的不确定关联。灰色关联理论提出了一种新的系统分析方法,即系统的灰色关联度分析方法,是根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间关联程度的方法。基本思路是根据各比较数列集构成的曲线族与参考数列构成的曲线之间的几何相似程度,来确定比较数列集与参考数列构成曲线的几何形状相似程度,其形状越相似,其相关联程度越大^[5-8]。灰色关联分析的计算步骤为:

(1) 设参考数列为 $Y_0(k)$,比较数列为 $Y_i(k), i=1,2,3,\dots,m$;序列长度为 N ;

(2) 对数列做无量纲化处理。由于各数列具有不同的量纲,且数量级不同,为了保证能得到正确的分析结果,首先应对原始数据进行初值化处理,即将各数列中每一个数均除以各自对应数列中的第一个数,得到相应的新的数列:

$$x_i(k) = \frac{Y_i(k)}{Y_i(1)}, \quad x_0(k) = \frac{Y_0(k)}{Y_0(1)} \quad (1)$$

(3) 利用初值化变换所得新数列可以计算关联数列与参考数列的关联系数,定义点关联系数的计算公式为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_{i \in m} \min_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) + x_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $\xi_i(k)$ ——第 k 时刻比较曲线 x_i 对参考曲线 x_0 的相对差值,这种形式的相对差值称 x_i 对 x_0 的在 k 时刻的关联系数; ρ ——分辨系数,取值一般在 0~1 之间,这里取 $\rho=0.5$ 。

(4) 计算关联度。有了关联系数计算公式,根据灰关联空间所述,关联度的计算公式为:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

(5) 规范化处理。

考虑 $x(i) = \{x_i(k) | k=1,2,\dots,n\}$

$$\text{令 } \max_{i \in m} \max_{k \in n} x = \max_{i \in m} \max_{k \in n} x_i(k)$$

$$\min_{i \in m} \min_{k \in n} x = \min_{i \in m} \min_{k \in n} x_i(k) \text{ 则}$$

$$x'(k) = \frac{x_i(k) - \min_{i \in m} \min_{k \in n} x}{\max_{i \in m} \max_{k \in n} x - \min_{i \in m} \min_{k \in n} x} \quad (4)$$

$$(k=1,2,\dots,n)$$

3 径流产沙量与其影响因子灰关联分析

选用产沙量为参考数列 $Y_0(k)$; 选用坡度 $Y_1(k)$, 容重 $Y_2(k)$, 雨强 $Y_3(k)$, 流速 $Y_4(k)$, 剪切力 $Y_5(k)$, 水流功率 $Y_6(k)$, 单位水流功率 $Y_7(k)$, 佛汝德数 Y_8

(k), 阻力系数 $Y_9(k)$ 这 9 个系列做为比较数列。产沙量及其影响因子的原始数据如表 2 所示。对表 2 中的数值按原始数据标准化处理的方法, 作区间值化处理, 计算结果如表 3 所示。根据公式(1—3)可计算出产沙量与其影响因子的关联度(表 4)。

表 2 产沙量及其影响因子计算结果

坡度/ (°)	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	水流剪切 力/Pa	水流功率/ ($N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	单位水流功率/ ($m \cdot s^{-1}$)	弗如 德数	阻力 系数	产沙量/ g
20	1.09	0.32	0.08	3.40	0.28	0.03	0.60	6.69	11.66
20	1.01	0.59	0.12	5.33	0.63	0.04	0.74	5.34	26.72
20	1.01	0.94	0.15	6.56	1.01	0.06	1.05	3.80	59.39
20	1.02	1.16	0.20	7.93	1.57	0.07	1.16	2.70	80.59
20	1.19	0.29	0.08	4.33	0.35	0.03	0.66	6.66	6.70
20	1.23	0.55	0.12	5.96	0.70	0.04	0.96	4.63	13.45
20	1.16	0.87	0.17	7.44	1.29	0.06	1.18	3.45	51.55
20	1.16	1.20	0.22	8.96	1.99	0.08	1.26	2.28	72.51
25	1.00	0.37	0.09	4.14	0.37	0.04	0.90	5.88	13.07
25	1.04	0.62	0.12	6.27	0.78	0.06	1.08	4.50	31.40
25	1.00	0.86	0.17	7.57	1.29	0.08	1.21	4.12	61.99
25	1.08	1.15	0.22	9.50	2.10	0.10	1.35	2.40	88.32
25	1.20	0.46	0.10	4.94	0.51	0.05	0.75	5.35	10.98
25	1.20	0.61	0.12	6.89	0.81	0.05	0.92	5.09	20.78
25	1.16	0.90	0.20	8.40	1.70	0.09	1.28	3.23	61.81
25	1.15	1.22	0.24	10.13	2.44	0.11	1.37	2.66	81.82

表 3 产沙量及其影响因子区间值化计算结果

$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$x_4(k)$	$x_5(k)$	$x_6(k)$	$x_7(k)$	$x_8(k)$	$x_9(k)$	$x_0(k)$
0.00	0.39	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	1.00	0.06
0.00	0.04	0.32	0.23	0.29	0.16	0.16	0.18	0.70	0.25
0.00	0.04	0.70	0.46	0.47	0.34	0.32	0.58	0.35	0.65
0.00	0.09	0.94	0.73	0.67	0.60	0.52	0.73	0.10	0.91
0.00	0.83	0.00	0.00	0.14	0.03	0.00	0.08	0.99	0.00
0.00	1.00	0.29	0.23	0.38	0.19	0.16	0.47	0.53	0.08
0.00	0.70	0.62	0.58	0.60	0.47	0.41	0.75	0.27	0.55
0.00	0.70	0.98	0.88	0.83	0.79	0.62	0.86	0.00	0.81
1.00	0.00	0.08	0.06	0.11	0.04	0.15	0.39	0.82	0.08
1.00	0.17	0.36	0.27	0.43	0.23	0.35	0.62	0.50	0.30
1.00	0.00	0.61	0.56	0.62	0.47	0.60	0.79	0.42	0.68
1.00	0.35	0.93	0.87	0.91	0.84	0.89	0.97	0.03	1.00
1.00	0.87	0.18	0.14	0.23	0.11	0.23	0.19	0.70	0.05
1.00	0.87	0.35	0.23	0.52	0.24	0.31	0.42	0.64	0.17
1.00	0.68	0.65	0.76	0.74	0.66	0.79	0.88	0.22	0.68
1.00	0.65	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.09	0.92

表 4 产沙量与其影响因子的关联度(γ)

$\gamma_{\text{坡度}}$	$\gamma_{\text{容重}}$	$\gamma_{\text{雨强}}$	$\gamma_{\text{流速}}$	$\gamma_{\text{剪切力}}$	$\gamma_{\text{水流功率}}$	$\gamma_{\text{单位水流功率}}$	$\gamma_{\text{佛汝德数}}$	$\gamma_{\text{阻力系数}}$
0.601	0.588	0.874	0.836	0.816	0.850	0.812	0.778	0.482

从表 4 可以看出对于室内实验的邙山黄土来说是 $\gamma_{\text{雨强}}=0.874$,说明雨强对产沙量影响最大,其次是水流功率、流速和剪切力等,其关联度值都达到了 0.815 以上,阻力系数贴近度值只有 0.482,影响最小。因此,可以用雨强和水流功率等建立坡面径流产沙量的相关关系式。

(1) 产沙量与雨强的相关关系。根据灰关联分析计算结果,雨强与产沙量的关联度最大,可以建立雨强与产沙量之间的关系式,通过线性回归分析,得到雨强和产沙量的关系式为:

$$W=62.3I^{1.75} \quad (R^2=0.934) \quad (5)$$

从公式(5)可以看出,坡面径流产沙量与雨强之间具有很强的相关关系,相关系数达到 0.934,实测值与计算值之间的标准误差为 0.22,F 检验达到显著水平。

(2) 水流功率与产沙量的相关关系。从灰关联计算中还可以得出,水流功率对输沙率的影响也比较大,因此可以建立水流功率和产沙量之间的相关关系式:

$$W=1.344\omega-53.926 \quad (R^2=0.876) \quad (6)$$

从公式(6)可以看出,水流功率和产沙量有很好的线性相关关系,相关系数比较高,达到了 0.876。

(3) 从以上两式可以看出,坡面径流产沙量与雨强和水流功率的单因子的相关性都比较高,实际上坡面侵蚀产沙不仅仅只受到一个因子的影响,往往受到多因子的综合影响,所以建立多因子的坡面降雨侵蚀产沙的回归模型更具有实际意义,为此,建立了和坡面降雨侵蚀产沙关联性较强的两个因子,雨强、水流功率和产沙量的相关关系式:

$$W=67.5I^{2.01}\omega^{-0.18} \quad (R^2=0.933) \quad (7)$$

通过 SPSS 软件进行回归分析可以得出,坡面径流产沙量与雨强和水流功率双因子之间的相关性也

是比较强的,相关系数达到 0.933,实测值与计算值之间的标准误差为 0.24,F 检验达到显著水平。

4 结论

(1) 通过灰关联分析可以得出,在人工模拟降雨条件下,邙山黄土的雨强和水流功率对坡面降雨侵蚀产沙量的影响非常显著,阻力系数和容重对产沙量的影响相对较小。

(2) 产沙量与雨强和水流功率都显著相关,可以用雨强和水流功率的幂函数来预测产沙量。研究结果,将有助于通过室内的坡面土壤侵蚀的变化规律去了解野外的坡面土壤侵蚀状况,进而为建立坡面水流失预报模型提供技术支持,对土壤侵蚀的防治及治理,具有实际意义。

[参 考 文 献]

- [1] 胡建军,王庆阳,刘焯娥.黄土高原地区生态环境状况与经济社会发展关系研究[J].水土保持研究,2006,13(4):254-259.
- [2] 唐克丽.黄土高原地区土壤侵蚀区域及其治理途径[M].北京:中国科学技术出版社,1991.
- [3] 辛树帜,蒋德麒.中国水土保持概论[M].北京:农业出版社,1982.
- [4] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中工学院出版社,1985.
- [5] 李占斌,鲁克新,丁文峰.黄土坡面土壤侵蚀动力过程实验研究[J].水土保持学报,2002,16(2):5-7,49.
- [6] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J].农业工程学报,2006,22(2):525-530.
- [7] 倪焱.灰色系统理论在水土流失因素分析中的应用[J].水土保持通报,1986,6(2):80-83.
- [8] 牛东晓.灰色关联分析法在电力建设工程评标中的应用[J].水电能源科学,1994,12(2):100-105.