

砖红壤区降雨因子对产流产沙的影响

余长洪, 李就好, 陈凯, 姜俊红, 韦歆娜

(华南农业大学 水利与土木工程学院, 广州 510640)

摘要:应用三种无量纲化的灰色关联法分析了 12 个降雨因子对于砖红壤区裸地和桉林地产流的影响, 以及 15 个降雨径流因子对于产沙的影响。结果表明:无量纲处理方法不同将导致因子关联度排序出现变化;复合因子的关联度大多数都高于单因子;与 PI_{30} 相比,在砖红壤区裸地中 PI_5 更能代表降雨侵蚀力指标,而桉林地则是 PI_{10} ; Q_m/H 在桉林地比通用的降雨侵蚀力更适于作为坡面降雨侵蚀模型的侵蚀动力因子。研究结果将有助于建立灰色关联法在土壤侵蚀研究中的标准化程序,为建立砖红壤区土壤侵蚀预报模型提供理论支持。

关键词:土壤侵蚀;降雨因子;径流侵蚀功率;灰色关联分析;无量纲化

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0017-04

Effects of Rainfall Factors on Runoff and Sediment Generation in Laterite Area

YU Changhong, LI Jiuhao, CHEN Kai, JIANG Junhong, WEI Xinna

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: By applying three dimensionless grey correlation analysis methods, effects of 12 rainfall factors on runoff generation, and then together 3 more runoff factors on sediment generation were quantitatively investigated in laterite bare lands and eucalyptus forests. Results showed that with different non-dimensionalization methods, correlation ranks of these factors changed. Most combined factors rank prior to single factors. Compared with PI_{30} where P is rainfall amount and I_{30} is rainfall density in 30 min, PI_5 is a proper indicator more suitable to represent rainfall-induced erosion in the laterite bare lands, and PI_{10} is another proper one in the case of laterite eucalyptus forests. Actually, in eucalyptus forests, prior to traditional rainfall factors, a combined factor representing runoff erosive power, denoted by Q_m/H , where Q_m is the peak discharge and H is runoff depth, is more suitable in hill slope soil erosion models. This study is of significance to guide an establishment of grey correlation of erosive factors and a standard procedure for soil erosion research. It also provides the theoretic support for the development of soil erosion prediction models in laterite regions.

Keywords: soil erosion; rainfall factors; runoff erosion power; grey correlation analysis; non-dimensionalization

土壤侵蚀已成为世界环境的危害之一,也是我国最大的环境问题。影响土壤侵蚀的因素复杂众多,其中,降雨是土壤侵蚀的主要动力。20 世纪 40 年代,Ellison 将水蚀过程分为 4 个过程,即雨滴侵蚀过程、径流侵蚀过程、雨滴搬运过程和径流搬运过程,并研究了溅蚀量与降雨强度之间的关系^[1]。Wischmeier 等研究发现了土壤侵蚀量与降雨动能和最大 30 min 降雨强度之间有密切关系,提出了降雨侵蚀力的概念^[2]。自 20 世纪 50 年代以来,我国学者朱显谟、吴发启、江忠善、郑粉莉、李占斌、余新晓等对降雨因子

与土壤侵蚀的关系进行了深入的研究^[3]。目前,研究从黄土高原区扩大到辽西、黑龙江、福建、云南、安徽大别山等地^[4-6]。

在研究时,降雨因子的选择至关重要,目前大多数侧重于研究降雨量(P)、降雨时间(T)和平均降雨强度(I)、10 min 降雨强度(I_{10})、30 min 降雨强度(I_{30})、复合因子 PI_{10} 、 PI_{30} 与土壤侵蚀的关系^[6-8]。而全面研究可能存在的所有降雨因子与土壤侵蚀的研究则较少,不利于全面揭示降雨因子与土壤侵蚀之间的关系。

目前降雨因子对产流产沙的影响分析方法主要

收稿日期:2014-03-11

修回日期:2014-04-03

资助项目:广东省科技计划项目“强降雨条件下雷州半岛坡耕地土壤侵蚀研究与应用示范”(2011B020309006)

第一作者:余长洪(1980—),男,江苏东台人,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持技术研究。E-mail:yuchanghong@scau.edu.cn

通信作者:李就好(1963—),男,江西万年人,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程有关研究。E-mail:jhlh@scau.edu.cn

有相关分析法、主成分分析法以及灰色关联分析法^[6-15],其中,灰色关联分析法是我国著名学者邓聚龙教授在 1982 年提出的一种新方法^[16-17],在土壤侵蚀研究中得到了广泛的应用。在运用灰色关联分析法时,无量纲处理方法不同将会导致关联序出现变化,因此,需对不同的无量纲方法得出的结果进行判断,选择最佳关联序。

本研究以砖红壤区为研究对象,分别运用三种无量纲化的灰色关联法研究 12 个降雨因子对于裸地和桉林地产流的影响,以及 15 个降雨径流因子对于裸地和桉林地产沙的影响。

1 材料和方法

研究区域为小良水土保持试验站,位于广东省电白县西南部的小良镇,属于热带季风气候区,土壤类型为砖红壤。区域年降雨量 1 400~1 700 mm,干湿季节分明,降雨主要集中在 5—9 月,占全年降雨量的 75.8%,降雨方式多为暴雨或暴风雨(台风雨),具有鲜明的地域特点。试验数据来源于 1989 年小良水土保持试验站 2 号试验场(纯桉林地)39 次降雨和 3 号试验场(裸地)61 次降雨记录。结合已有研究成果^[6-15,18],分析得出本研究降雨因子分别为降雨时间

(T)、前期降雨间隔时间(T_L)、降雨量(P)、前期降雨量(P_L)、平均降雨强度(I)、前期平均降雨强度(I_L)、5 min 降雨强度(I_5)、10 min 降雨强度(I_{10})、30 min 降雨强度(I_{30})、复合因子 PI_5, PI_{10}, PI_{30} 。研究降雨因子与产沙模数(M)的关系时,增加洪峰流量模数(Q_m')、径流深(H)、径流侵蚀功率($Q_m'H$)。

常用灰色关联分析无量纲处理方法有三种,即均值化、初值化和标准化处理,计算公式如下:

均值化处理

$$x_i(k) = y_i(k) / \bar{y}_i \quad (1)$$

初值化处理

$$x_i(k) = y_i(k) / y_i \quad (2)$$

标准化处理

$$x_i(k) = [y_i(k) - \bar{y}_i] / \sigma_i \quad (3)$$

式中, $i=0,1,2,\dots,n;k=1,2,\dots,m;\bar{y}_i,\sigma_i$ 指因素 y_i 的样本平均值和样本方差。

灰色关联分析法主要针对正相关因子进行分析,当分析因素中存在负相关因素时,需进行指标类型一致化处理,令:

$$x_i^* = M - x_i \quad (4)$$

式中: M ——因素 x 的一个允许上界,取 $M = \max(x_i)$ 。

关联系数的计算公式为:

$$\xi_i(k) = \gamma[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_{i \in m} \min_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i \in m} \max_{k \in n} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

式中: $\xi_i(k)$ ——第 k 时刻比较曲线 x_i 对参考曲线 $x_0(k)$ 的相对差值,这种形式的相对差值称 $x_i(k)$ 对在 $x_0(k)$ 时刻的关联系数; ρ ——分辨系数,取值一般为 0~1,这里取 0.5。关联度 r_i 的计算公式为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (6)$$

表 1 裸地相关分析

相关性	T	T_L	P	P_L	I	I_L	I_5	I_{10}	I_{30}	Q_m'	H	PI_5	PI_{10}	PI_{30}	$Q_m'H$
H	0.48**	-0.08	0.92**	-0.12	0.37*	0.03	0.70**	0.78**	0.89**	—	—	0.97**	0.99**	0.98**	—
M	0.53**	-0.03	0.88**	-0.15	0.42**	-0.03	0.71**	0.75**	0.83**	0.70**	0.88**	0.85**	0.84**	0.79**	0.69**

注:(1)**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,下同。

通过表 2 可以看出,三种无量纲化方法处理的灰色关联分析结果是不同的,同时发现在裸地径流分析结果中三种方法的结果前五因子关联序是一致的,表 3 中的结果则变化较大,因此,需要通过判断从中选择出最佳关联序。

根据已有研究成果^[19],本文的判断原则为:

(1) 极差 $\Delta_k = \max(r_i^k) - \min(r_i^k)$

2 结果与分析

对裸地的数据进行相关分析,分析结果见表 1。从表中可以看出,存在负相关因素,需根据式(4)进行指标类型一致化处理。处理后的数据进行灰色关联分析,分析结果见表 2,表 3。

式中, $i=1,2,\dots,n;k=1,2,3$ 尽可能大;

$$(2) \text{ 样本方差 } \sigma_k = \frac{1}{n-1} \sum (r_i^k - \bar{r}_i^k)^2$$

式中, $\bar{r}_i^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^k$ 尽可能大。

通过判断得知,裸地产流产沙的灰色关联分析初值化的无量纲化处理结果是最佳关联序。裸地影响径流的因子关联序为 $PI_{30} > T > PI_{10} > P_L > PI_5 >$

$I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > I_5 > I > P$, 即 $PI_{30} > \text{降雨时间} > PI_{10} > \text{前期降雨量} > PI_5 > 30 \text{ min 降雨强度} > 10 \text{ min 降雨强度} > \text{前期平均降雨强度} > \text{前期降雨间隔时间} > 5 \text{ min 降雨强度} > \text{平均降雨强度} > \text{降雨量}$ 。裸地影响产沙的因子关联序为 $PI_5 > T > PI_{10} > PI_{30} > Q_m' H > H > P_L > Q_m' > I_{30} > I_{10} > T_L > I_L > I_5 > I > P$, 即 PI_5

$> \text{降雨时间} > PI_{10} > PI_{30} > \text{径流侵蚀功率} > \text{径流深} > \text{前期降雨量} > \text{洪峰流量模数} > 30 \text{ min 降雨强度} > 10 \text{ min 降雨强度} > \text{前期降雨间隔时间} > \text{前期平均降雨强度} > 5 \text{ min 降雨强度} > \text{平均降雨强度} > \text{降雨量}$ 。

以同样的方法对桉林地进行分析, 相关分析结果见表 4, 灰色关联分析结果见表 5, 表 6。

表 2 裸地径流灰色关联分析

无量纲方法	关联序	Δ	σ
均值化	0.929, 0.820, 0.734, 0.914, 0.707, 0.775, 0.744, 0.814, 0.823, 0.853, 0.926, 0.948 $PI_{30} > T > PI_{10} > P_L > PI_5 > I_{30} > T_L > I_{10} > I_L > I_5 > P > I$	0.24139	0.0069
初值化	0.947, 0.834, 0.512, 0.919, 0.700, 0.767, 0.703, 0.793, 0.809, 0.857, 0.944, 0.961 $PI_{30} > T > PI_{10} > P_L > PI_5 > I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > I_5 > I > P$	0.44886	0.017121
标准化	0.951, 0.854, 0.809, 0.918, 0.806, 0.835, 0.796, 0.864, 0.869, 0.888, 0.945, 0.964 $PI_{30} > T > PI_{10} > P_L > PI_5 > I_{30} > I_{10} > T_L > I_L > P > I > I_5$	0.16802	0.003482

表 3 裸地产沙灰色关联分析

无量纲方法	关联序	Δ	σ
均值化	0.920, 0.849, 0.832, 0.890, 0.837, 0.857, 0.836, 0.887, 0.887, 0.889, 0.911, 0.938, 0.922, 0.927, 0.928 $PI_5 > Q_m' H > PI_{30} > PI_{10} > T > H > P_L > Q_m' > I_{10} > I_{30} > I_L > T_L > I > I_5 > P$	0.10587	0.001387
初值化	0.929, 0.864, 0.694, 0.908, 0.801, 0.853, 0.830, 0.883, 0.886, 0.897, 0.918, 0.934, 0.927, 0.926, 0.921 $PI_5 > T > PI_{10} > PI_{30} > Q_m' H > H > P_L > Q_m' > I_{30} > I_{10} > T_L > I_L > I_5 > I > P$	0.24051	0.004164
标准化	0.875, 0.813, 0.776, 0.880, 0.747, 0.814, 0.748, 0.851, 0.859, 0.872, 0.845, 0.927, 0.900, 0.918, 0.932 $Q_m' H > PI_5 > PI_{30} > PI_{10} > P_L > T > Q_m' > I_{30} > I_{10} > H > I_L > T_L > P > I_5 > I$	0.18487	0.003644

表 4 桉林地相关分析

相关性	T	T_L	P	P_L	I	I_L	I_5	I_{10}	I_{30}	Q_m'	H	PI_5	PI_{10}	PI_{30}	$Q_m' H$
H	0.44**	-0.08	0.98**	-0.09	0.44**	-0.06	0.74**	0.72**	0.84**	—	—	0.94**	0.93**	0.95**	—
M	0.17	0.07	0.48**	-0.05	0.21	0.05	0.54**	0.55**	0.55**	0.56**	0.50**	0.58**	0.60**	0.54**	0.59**

表 5 桉林地径流灰色关联分析

无量纲方法	关联序	Δ	σ
均值化	0.945, 0.818, 0.784, 0.940, 0.756, 0.839, 0.763, 0.868, 0.871, 0.901, 0.972, 0.970 $PI_{10} > PI_{30} > T > P_L > PI_5 > I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > P > I_5 > I$	0.21599	0.006118
初值化	0.904, 0.891, 0.891, 0.900, 0.891, 0.886, 0.891, 0.908, 0.909, 0.918, 0.937, 0.950 $PI_{30} > PI_{10} > PI_5 > I_{30} > I_{10} > T > P_L > I_5 > P > I > T_L > I_L$	0.06354	0.000395
标准化	0.950, 0.843, 0.819, 0.923, 0.820, 0.863, 0.818, 0.877, 0.880, 0.901, 0.968, 0.970 $PI_{30} > PI_{10} > T > P_L > PI_5 > I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > I > P > I_5$	0.15134	0.003207

表 6 桉地地产沙灰色关联分析

无量纲方法	关联序	Δ	σ
均值化	0.949, 0.893, 0.880, 0.934, 0.879, 0.907, 0.871, 0.919, 0.921, 0.934, 0.958, 0.955, 0.965, 0.966, 0.969 $Q_m' H > PI_{30} > PI_{10} > H > PI_5 > T > P_L > Q_m' > I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > P > I > I_5$	0.09837	0.001180
初值化	0.909, 0.902, 0.900, 0.904, 0.902, 0.901, 0.868, 0.905, 0.905, 0.906, 0.920, 0.906, 0.910, 0.912, 0.916 $H > Q_m' H > PI_{30} > PI_{10} > T > Q_m' > PI_5 > I_{30} > I_{10} > P_L > T_L > I > I_L > P > I_5$	0.05241	0.000136
标准化	0.907, 0.834, 0.854, 0.924, 0.786, 0.854, 0.807, 0.887, 0.890, 0.911, 0.931, 0.943, 0.959, 0.958, 0.964 $Q_m' H > PI_{10} > PI_{30} > PI_5 > H > P_L > Q_m' > T > I_{30} > I_{10} > I_L > P > T_L > I_5 > I$	0.17836	0.003178

通过判断得知,桉林地产流产沙的灰色关联分析均值化的无量纲化处理结果是最佳关联序。桉林地影响径流的因子关联序为 $PI_{10} > PI_{30} > T > P_L > PI_5 > I_{30} > I_{10} > I_L > T_L > P > I_5 > I$, 即 $PI_{10} > PI_{30} > \text{降雨时间} > \text{前期降雨量} > PI_5 > 30 \text{ min 降雨强度} > 10 \text{ min 降雨强度} > \text{前期平均降雨强度} > \text{前期降雨间隔时间} > \text{降雨量} > 5 \text{ min 降雨强度} > \text{平均降雨强度}$ 。桉林地影响产沙的因子关联序为 $Q_m' H > PI_{10} > PI_{30} > PI_5 > H > P_L > Q_m' > T > I_{30} > I_{10} > I_L > P > T_L > I_5 > I$, 即 $\text{径流侵蚀功率} > PI_{10} > PI_{30} > PI_5 > \text{径流深} > \text{前期降雨量} > \text{洪峰流量模数} > \text{降雨时间} > 30 \text{ min 降雨强度} > 10 \text{ min 降雨强度} > \text{前期平均降雨强度} > \text{降雨量} > \text{前期降雨间隔时间} > 5 \text{ min 降雨强度} > \text{平均降雨强度}$ 。

3 结论与讨论

(1) 提出灰色关联分析法在降雨因子对产流产沙影响研究时的规范化程序,即首先需进行相关分析,对于负相关因子进行指标类型一致化处理,然后应使用多种无量纲化方法进行分析,最后通过判断原则选择出最佳关联序。

(2) 降雨因子的选择应尽量全面,通过分析可知,无论是裸地还是桉林地,前期降雨量对于产流产沙的影响都较大。另外,对桉林地产沙影响最大的是径流侵蚀功率。因此,在建立土壤侵蚀模型时需综合考虑以上降雨因子,使得模型更加完善。

(3) 通过对结果的分析可知,裸地中对产流产沙影响最小的两因子是平均降雨强度、降雨量,而桉林地中是 5 min 降雨强度、平均降雨强度。降雨量的排序在所有结果中都较低,这和以往的研究结果有区别^[5-7],导致的原因可能是研究因子的选择方面,以往的研究因子较少,所以排序靠前,还有可能是砖红壤区的特性所造成的,这需要进一步研究。

(4) 在所有的结果中,复合因子的关联度大多数都高于单因子,这是因为复合因子更具有物理学含义,比如 $PI_{30}(PI_5, PI_{10})$ 代表降雨侵蚀力, $Q_m' H$ 代表径流侵蚀功率。

(5) 根据研究表明,降雨侵蚀力指标在各地都有所不同^[3]。通过砖红壤区的研究结果可知,在砖红壤区裸地中 PI_5 更能代表降雨侵蚀力指标,而桉林地则是 PI_{10} 。

(6) $Q_m' H$ 在砖红壤区桉林地比通用的降雨侵蚀力更适于作为坡面降雨侵蚀模型的侵蚀动力因子,而裸地则还是通用的降雨侵蚀力更适合。植被是造成这种结果的主要原因,但其机理还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ellison W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Aric. Eng.*, 1944, 25: 131-136.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. *Agric Handb537*[M]. Washington D C: USDA, 1978.
- [3] 郑粉莉, 江忠善, 高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 伊燕平, 卢文喜, 许晓鸿. 基于 RBF 神经网络的土壤侵蚀预测模型研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 25-28.
- [5] 李耀明, 王玉杰, 储小院, 等. 降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 244-249.
- [6] 段青松, 字淑慧, 吴伯志. 滇中地区小流域治理前后降雨因子对产流、产沙影响的灰色关联分析[J]. *云南农业大学学报*, 2006, 21(3): 336-340.
- [7] 刘培娟, 赵增丽, 邢燕, 等. 鲁中南降雨因子对不同种植下坡耕地产流产沙影响的灰色关联分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(31): 19415-19418.
- [8] 朱兴平. 定西黄土丘陵沟壑区降雨因子对坡面产流、产沙影响的灰色关联分析[J]. *农业系统科学与综合研究*, 1997, 13(2): 127-130.
- [9] 孙家振, 董召荣, 赵波, 等. 侵蚀性降雨与土壤侵蚀关系的研究[J]. *安徽农学通报*, 2011(13): 133-136.
- [10] 赵芹珍, 贾志军, 王小平. 小流域降雨因子与水土流失的相关性分析[J]. *山西水土保持科技*, 2010(2): 16-18.
- [11] 李林锋, 刘新田. 雷州半岛降雨特性与地表径流关系的小区试验[J]. *湛江海洋大学学报*, 2004, 24(3): 70-73.
- [12] 罗细芳, 姚小华. 垦耕地经济林模式泥沙流失与降雨因子的灰色关联研究[J]. *经济林研究*, 2004, 22(4): 12-14.
- [13] 陈逸欣. 土壤侵蚀量与降雨因子间的灰关联分析[J]. *人民珠江*, 2002(5): 51-52.
- [14] 孟君, 王慧觉, 卫苗苗. 公路建设项目中降雨因子对土壤流失量的影响分析[J]. *交通科技*, 2007(5): 81-83.
- [15] 顾新庆, 于增彦, 赵海玉, 等. 降雨因子对小流域径流的影响[J]. *河北林业科技*, 1996(2): 19-23.
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- [17] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] 彭清娥, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 坡面产沙 BP 神经网络模型研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 79-82.
- [19] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理对灰色关联序的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2002, 36(2): 199-202.