

# 陕北丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标研究

杨开宝 郭培才

(陕西省黄土高原治理研究所·米脂县·718100)

## 提 要

降雨侵蚀力( $R$ )是引起土壤侵蚀的潜在能力,是降雨物理特征的函数。 $R$ 值的计算方法众多,且过程繁琐。该文就陕西省黄土高原治理研究所农耕地标准径流小区(1983~1991年)观测资料,运用计算机技术,采用灰色系统理论中关联分析的方法,对 $R$ 指标的不同复合参数与土壤侵蚀量的关系进行了系统分析,并在回归分析的基础上,对一次降雨(特别是短历时暴雨)的总动能简化计算方法进行了有益的探讨,推导出一个简化计算式。

关键词: 降雨侵蚀力 关联分析 侵蚀动能

## Study on Erosivity Index of Rainfall in Northern Shaaxi Hilly and Gully Area

Yang Kaibao Guo Peicai

(Institute of loess plateau Control of shaanxi province, Mizhi, Shaanxi, 7181000)

## Abstract

Erosivity of rainfall ( $R$ ) is the potential ability which cause soil erosion and is the function of the physics characteristic of rainfall. There are many methods to calculate the value  $R$ . But the calculating process is overlaborate.

Based on the observation data from the normal runoff plots (MP-I, blank controlled) on the cultivated land of our institute during 1983-1991, the relationships between the different compound parameter of index  $R$  and amount of soil erosion has been systematically analysed by the method of correlation analysis in grey system theory and computer technique. And based on the regression analysis, the simplified calculation method of the total kinetic energy of once rainfall (especially the torrential rain during a short period of time) has been approached beneficially, and a simplified caculation has been deduced.

**Key words** rainfall erosivity correlation analysis erosion kinetics

降雨侵蚀力( $R$ )是引起土壤侵蚀的潜在能力,它与一次降雨的雨滴总动能、降雨强度等因子的大小关系密切,直接决定着土壤的侵蚀强度。其作用机制主要表现为雨滴动能对土壤的溅蚀、土壤颗粒的分散及对薄层地表径流的紊动。 $R$ 值的计算方法众多,且过程繁琐,主要有瞬时雨强法( $EI$ )、通用指标法( $UI$ )、综合指标法( $KE > 25$ )和微分法等。但哪种方法的计算结果更能较准确地反映出陕北丘陵沟壑区降雨的潜在侵蚀能力,计算能否简化,有待于进一步探讨。笔者就瞬时雨强法对陕西省黄土高原治理研究所农耕地标准径流小区(MP-I<sub>2</sub>区)1982~1991年间11

次典型降雨和径流的原始资料,采用灰色关联分析的方法,对  $R$  指标的不同复合参数与土壤侵蚀量的关系进行系统分析,这既是对前人研究成果的验证,又是灰色系统理论在水土流失规律探讨中的一次具体应用。

径流小区位于陕西省米脂县磨石沟流域崩坡中部,地理位置东经  $110^{\circ}14'$ ,北纬  $37^{\circ}46'$ 。小区规格采用美国标准,坡度为  $14^{\circ}$ ,坡向 NE~SW,措施为空白地休闲。小区的设计、观测都比较合理,资料来源可靠,降雨及土壤侵蚀特征在陕北丘陵沟壑区具有代表性。

## 一、 $R$ 指标的定量计算

资料来源于陕西省米脂县磨石沟流域,米脂县与绥德县为邻县,相距 40km,故降雨动能的计算采用中科院西北水保所江忠善绥德地区经验公式<sup>[1]</sup>进行计算:

$$e = 28.89 + 11.36Lgi \quad (1)$$

式中:  $e$ ——雨滴动能( $J/m^2 \cdot cm^{-1}$ );  $i$ ——时段降雨强度( $cm/h$ );

计算一次降雨总能量的步骤为:

1. 从自计雨量计记录的降雨过程线中,将一次降雨曲线按雨强划分为若干段,并找出每段的降雨历时( $t$ )和降雨量( $P$ );
2. 依据降雨量和降雨历时计算时段降雨强度( $i$ );  $i = p/t$ ;
3. 按式(1)计算各时段每厘米降雨动能;
4. 用每段降雨量乘以每厘米降雨动能,得出各时段降雨动能; $E_i = ep$ ;
5. 累计各时段降雨动能,得该次降雨的总能量; $E = \sum E_i$ 。

不同历时段最大雨强以 5min、10min、20min、30min 和 60min 5 个等级进行统计,其值可以从降雨过程线中直接分析查找。计算结果见表 1。

表 1  $R$  不同复合参数及土壤侵蚀量表

产流日期 (年、月、日)	E	参 数						侵蚀量 ( $t/km^2$ )
		EI <sub>5</sub>	EI <sub>10</sub>	EI <sub>20</sub>	EI <sub>30</sub>	EI <sub>60</sub>	EI	
19870715	68.60	4.45	4.08	2.66	1.96	1.03	0.50	3259.0
19870826	184.82	27.72	16.08	10.20	8.13	6.23	1.31	2334.4
19880707	47.42	2.85	1.17	0.77	0.74	0.52	0.17	245.7
19880715	118.04	8.50	6.23	3.79	2.93	1.70	0.81	2044.8
19880731	66.29	4.38	3.38	2.59	1.92	1.12	0.84	2113.2
19880812	75.12	5.41	4.37	3.61	2.40	1.20	0.83	2726.6
19890717	162.32	13.63	11.69	9.01	7.11	4.19	1.77	3295.5
1990726	27.04	0.65	0.50	0.35	0.29	0.19	0.09	646.2
19900903	36.22	1.61	0.91	0.68	0.59	0.42	0.42	1191.0
19910605	28.93	1.32	0.82	0.54	0.39	0.28	0.28	655.2
19910609	121.79	8.48	5.85	4.97	3.53	2.62	0.85	1274.0

## 二、 $R$ 指标最佳复合参数灰色关联分析

灰色关联分析的基本思路是:根据各比较数列集构成的曲线族,与参考数列构成的曲线间的几何相似程度来确定比较数列集与参考数列间的关联序。比较数列构成的曲线与参考数列构成的曲线的几何形状越相似,其关联度越大,比较数与参考数列既可以是有序列,又可以是非时序的系列<sup>[2]</sup>。

笔者选择表 1 中土壤侵蚀量系列为参考数列 ( $y_0$ ), 选择  $R$  不同复合参数 ( $EI_5$ 、 $EI_{10}$ 、 $EI_{20}$ 、 $EI_{30}$ 、 $EI_{60}$ 、 $EI$ ) 系列为比较数列 ( $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 、 $y_6$ )。由于各数列具有不同的量纲, 且数量级不同, 首先按式(2)对数据进行无量纲化处理:

$$X_i(k) = y_i(k) / \bar{y}_i \quad (2)$$

其中,  $\bar{y}_i = \frac{1}{11} \sum_{k=1}^{11} y_i(k)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ ;  $k = 1, 2, \dots, 11$ 。

然后按式(3) 计算比较数列 ( $y_i$ ) 对参考数列 ( $y_0$ ) 在第  $K$  个元素上的关联系数  $\xi_i(K)$ :

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  称为分辨系数。随着  $\rho$  值的增加, 关联系数的下界值也增加。 $\xi_i(k)$  的取值范围相应缩小, 其分辨率也随之下降,  $\rho$  值一般在  $0 \sim 1$  之间选取, 这里取  $\rho = 0.5$ 。关联系数的平均值即为关联度, 用  $\gamma_i$  表示, 计算式为:

$$\gamma_i = \frac{1}{11} \sum_{k=1}^{11} \xi_i(k) \quad (4)$$

$K = 1, 2, \dots, 11$ ;  $i = 1, 2, \dots, 6$ ;

按照上述思路步骤编成计算机程序, 将表 1 数据进行微机运算, 分别计算出上述 6 种复合参数下  $R$  与土壤侵蚀量 ( $A$ ) 间的关联度(表 2)

表 2 关联分析结果表

参数	$EI_5$	$EI_{10}$	$EI_{20}$	$EI_{30}$	$EI_{60}$	$EI$
$\gamma_i$	0.798	0.841	0.821	0.819	0.789	0.788

计算结果表明: 复合参数  $EI_{10}$  与土壤侵蚀量的关联度最大, 说明在陕北丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标  $R$  采用复合参数  $EI_{10}$  进行计算是比较合适的

的, 这一结果与中科院西北水保所王万忠所作的黄土地区的研究结果<sup>[3]</sup> 以及山西省水保所贾志军等所作的晋西黄丘区的研究结果<sup>[1]</sup> 完全一致。土壤侵蚀量与复合参数  $EI_{20}$ 、 $EI_{30}$  的关联程度基本接近, 而且数值都较高, 说明  $R$  指标采用  $EI_{20}$  或  $EI_{30}$  进行计算也是可行的, 这一结果在暴雨强度比较缓的情况下计算  $R$  值, 结果会更准确一些。计算结果同时还表明, 复合参数  $EI_5$ 、 $EI_{60}$  及  $EI$  与土壤侵蚀量的关联程度都不好, 而且  $EI$  的关联度最小, 说明用平均雨强计算  $R$  值是不合适的, 这是因为黄土丘陵沟壑区的产流降雨特征是高强度, 短历时, 历时一般小于 1h, 之后, 又出现一段低强度降雨, 这一段雨强虽小, 但历时都很长, 有一定的雨量, 一般不会引起土壤侵蚀。为此, 笔者统计了  $MP - I_2$  号径流小区 1982~1991 年 25 次产流降雨过程, 历时小于 60min 的降雨就达 14 次, 占 56.0%, 其余大部分雨量也都是集中于开始的几十分钟内。综上所述,  $R$  指标复合参数在陕北丘陵沟壑区的优先顺序应为:  $EI_{10}$ 、 $EI_{20}$ 、 $EI_{30}$ 、 $EI_5$ 、 $EI_{60}$ 。土壤侵蚀量主要由连续最大 10min 雨强内降雨所产生。

### 三、相关性检验及 E 值的简化计算

#### (一) 复合参数 $EI_{10}$ 与土壤侵蚀量相关分析

灰色关联分析的结果表明:  $EI_{10}$  与土壤侵蚀量的关联程度最大, 这只能说明几种复合参数的优先顺序, 是个相对值, 不能表明它们之间的相关关系怎样, 相关形态如何? 是线性相关还是非线性相关? 相关系数有多大? 这就需要对二者进行回归分析。对  $MP - I_2$  号径流小区 1983~1991 年间 14 次典型产流降雨的  $EI_{10}$  值与相对应的土壤侵蚀量进行线性函数与幂函数回归计算(表 3),

结果为:

$$A_1 = 522.25EI_{10} - 519.47 \quad r_1 = 0.903$$

$$A_2 = 823.01(EI_{10})^{1.3499} \quad r_2 = 0.837$$

根据(5)式计算出上述两回归方程统计量  $F$  值<sup>[5]</sup>:

$$F = \frac{r^2/p}{(1-r^2)/(n-p-1)} \quad (5)$$

式中:  $r$ ——相关系数;  $P$ ——自变量个数;  $n$ ——样本数。

则  $F_1 = 53.01$ ,  $F_2 = 28.08$ , 查表得  $F_{0.01}(1,12) = 3.18$ , 因  $F_1 > F_{0.01}$ ,  $F_2 > F_{0.01}$  说明土壤侵蚀量与复合参数  $EI_{10}$  相关极显著, 而且相关形态以线性正相关最好。

表 3  $EI_{10}$  与土壤侵蚀量(A) 回归分析数据表

序号	1	2	3	4	5	6	7
$EI_{10}$	5.85	37.96	0.82	0.91	6.98	11.69	4.37
A	1274.0	24310.5	655.2	1191.0	2534.0	3295.5	2726.6
序号	8	9	10	11	12	13	14
$EI_{10}$	3.38	6.23	3.59	16.08	25.00	4.08	1.58
A	2113.2	2044.8	4369.3	2335.5	9129.0	3258.0	610.5

## (二) $E$ 值的简化计算

$R$  指标的计算工作量大, 程序繁杂, 特别是计算一次降雨过程总能量  $E$  时, 必须分析降雨自计曲线的全过程, 这样既费时间, 又很麻烦。为了节省时间, 减少工作量, 可否寻找一种简便方法, 以尽快求得  $R$  值? 中科院西北水保所王万忠研究表明<sup>[3]</sup>: 适用于黄土地区农田土壤流失量预测中的降雨侵蚀力指标为:

$$R = E_{60}I_{10} \quad \text{或} \quad R = \Sigma EI_{10}$$

它表明用  $E_{60}$  代替  $\Sigma E$  是可行的, 而且  $E_{60}I_{10}$  与土壤侵蚀量间的相关系数要高于  $\Sigma EI_{10}$ 。笔者考虑到黄土丘陵区的降雨特征是短历时, 突发型, 几乎 50% 以上的产流降雨历时小于 60min。对于这样的暴雨过程,  $E_{60}$  是无法进行计算的。笔者以为, 用  $E_{10}$  来代替  $E$  也是可行的。为此, 统计了  $MP - I_2$  号小区 1983 ~ 1991 年间 19 次产流降雨的  $E_{10}$  及  $E$  值, 并以复合参数  $E_{10}I_{10}$  代替  $EI_{10}$  与土壤侵蚀量(A) 进行回归分析(表 4)、 $E_{10}$  与  $E$  进行回归分析(见表 5、图 1), 结果为:

$$A = 2760.19(E_{10}I_{10}) - 3136.32 \quad r = 0.817$$

$E_{10}I_{10}$  与  $A$  间呈极显著线性正相关, 说明用  $E_{10}$  代替  $E$  进行简化计算是可行的。

表 4  $E_{10}I_{10}$  与土壤侵蚀量(A) 回归分析数据表

序号	1	2	3	4	5	6	7
$E_{10}I_{10}$	1.76	6.62	0.96	0.84	3.74	2.78	2.19
A	1274.0	24310.5	655.2	1191.0	2534.0	3295.5	2726.6
序号	8	9	10	11	12	13	14
$E_{10}I_{10}$	1.88	1.96	1.88	3.44	6.34	2.24	0.96
A	2113.2	2044.8	4369.3	2335.5	9129.0	3258.0	610.5

表 5 E、E<sub>10</sub>回归分析数据表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E	70.35	47.42	118.04	66.29	75.12	162.32	43.66	27.04	36.22
E <sub>10</sub>	36.93	33.33	37.10	36.93	37.58	38.63	35.60	31.95	33.45
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
74.55	40.24	68.60	166.65	184.82	58.15	43.86	28.93	243.31	121.79
39.92	37.83	37.68	42.25	39.56	39.28	34.00	34.00	42.44	36.63

从附图的散点分布情况可以明显地看出, E<sub>10</sub> 与 E 二者存在指数函数关系, 经回归分析, 函数关系式为:

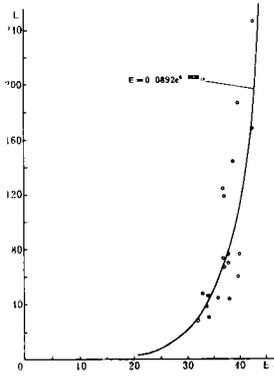
$$E = 0.0892e^{0.1803E_{10}} \quad (6)$$

$$r = 0.810$$

根据(5)式计算该回归方程统计量得  $F = 32.43$ , 查表得  $F_{0.01}(1, 17) = 8.40$ ,  $F > F_{0.01}$ , 说明二者的指数函数关系呈极显著相关。

这样, 只需从降雨过程线中查算出  $I_{10}$ , 按式(1)计算出  $E_{10}$ , 即可据(6)式算出  $E$  值, 既可加快计算速度, 又可大大减少工作量。格式(1)代入式(6), 则式(6)还可以进一步简化成式(7)。

$$E = 0.0892e^{(5.2089 + 2.0482 \lg I_{10})} \quad (7)$$



附图 E 与 E<sub>10</sub>散点图及关系曲线

### 四、结 论

综上所述, 可初步得出如下几点结论:

1. 复合参数  $EI_{10}$  与土壤侵蚀量的关联度最大, 对于陕北丘陵沟壑区在计算  $R$  值的瞬时雨强法中,  $EI_{10}$  是  $R$  值的最好量度, 今后应推广应用。

2.  $E_{10}$  与  $E$  之间存在着极显著的指数函数关系, 关系式为:

$$E = 0.0892e^{0.1803E_{10}}$$

用此式可使  $R$  值的繁琐计算过程简化, 特别适合于短历时暴雨  $E$  值的计算。

3. 对于资料年限短, 样本数少的水土流失数据, 采用灰色关联分析的方法进行处理, 更能发挥优势。