

降雨特征与水土流失关系的研究

贾志伟 江忠善 刘 志

(中国科学院水利部西北水土保持研究所, 陕西杨陵)

摘 要

本文基于野外天然降雨定位试验观测资料, 对降雨特征值的组合因子与水土流失量之间进行了多元统计相关分析。结果表明: 降雨动能与最大30min雨强的组合因子 EI_{30} 与侵蚀量的关系最为密切, 以降雨总量与最大30min雨强的乘积 PI_{30} 取代 EI_{30} , 经过检验, 指标的精度能满足计算侵蚀量的需要, 此指标可在黄土高原地区推广应用, 建立了反映降雨径流影响侵蚀的综合数学模型; 并指出, 径流势能对侵蚀量具有极其重要的影响作用。

关键词: 降雨特征 坡地 水土流失

前 言

水土流失是自然界普遍存在的一种环境演变现象。其影响因素涉及较多, 就自然因素而言, 降雨是促成水土流失发生发展的最主要外部动力条件。降雨特征与水土流失强度之间存在着不同程度的关系, 表现降雨特征的指标主要有降雨量、降雨强度、降雨动能、降雨类型和雨型结构等。在黄土高原地区, 由于黄土母质性土壤的疏松易侵蚀特性和降雨集中特点的影响, 使得降雨的侵蚀作用在这里表现得更为突出。

降雨特征作为反映土壤侵蚀的主要因素, 前人对其研究较多, 并得出了不少有价值的研究成果^[1~4]。但由于影响土壤侵蚀的降雨参数不但与雨强和雨型等有关, 也随着地理位置的不同而有所变化, 即存在着地域性的差异。为此, 本文根据西北水土保持研究所安塞水土保持试验站1985~1989年5年的观测资料, 探讨了降雨特征值与水土流失量之间的统计规律。

1 试验布设

安塞水土保持试验站位于陕北中部, 延河一级支流杏子河下游, 属黄土丘陵沟壑区第二副区。试验区年平均降水量为549.1mm, 降水的主要特点是年际变率大, 年内分配不均。最大年降水量为957.8mm (1964年), 最小年降水量为351.3mm (1986年), 两者相差2.73倍; 年内降水主要集中于夏秋两季, 其中7~9月的降水量占全年总量的61.1%, 且多以暴雨的形式出现。水土流失极其严重, 多年平均侵蚀模数为14 000t/km²。

本研究的试验是在试验区土壤侵蚀试验场进行的。本文分析所依据的资料只是其中1组试验的6个径流小区资料。由5°、10°、15°、20°、25°、28°共6级坡度组成, 每个小区水平投影面积均为5m×20m。在观测期间采用人工拔草, 以保持地面处于裸露状态。试验场土壤为黄土母质性黄绵土, 质地为轻粉质壤土。

观测项目分为两个部分，其一为通过径流分流箱和集水桶量测浑水总量并采样；其二为通过自计雨量计观测各次降雨雨量及雨强变化过程，并在室内以遥测雨量计辅助观测。将每次观测采集的泥水样在室内进行烘干称重处理，以推求小区侵蚀量的大小。

2 试验结果与讨论

2.1 降雨特征对侵蚀量的影响

大量观测数据的统计结果表明，侵蚀量与一次降雨总量之间的关系并不理想^[2,3]，它仅能从定性的角度说明，降雨量越大，侵蚀量越大。但在相同雨量条件下侵蚀量变化的差异表明，它还与其它的降雨指标有关。因此，经过采用不同降雨特征指标组合关系的影响，才能从定量的角度分析其结果。

2.1.1 侵蚀量与降雨量及平均雨强的关系。降雨量和平均雨强作为反映降雨的最基本特征指标，与侵蚀量的关系如何呢？根据5年期间39次降雨侵蚀观测资料，我们对次降雨量*P*和平均雨强*I*两因素与侵蚀模数*M_s*的关系采用多元幂函数回归分析，其表达式为：

$$M_s = AP^aI^b \tag{1}$$

式中：*M_s*——某一定坡度*S*（°）的一次降雨侵蚀模数（t/km²）；

P——一次降雨量（mm）；

I——平均雨强（mm/h）；

A、*a*、*b*为统计参数。

表1 不同坡度条件下侵蚀模数与降雨量及平均雨强的统计分析结果

<i>S</i> (°)	<i>A</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>F</i>	<i>T</i> ₁	<i>T</i> ₂	<i>R</i>
5	0.082 8	1.205 0	1.470 9	15.353**	3.157**	4.391**	0.460
10	0.090 4	1.236 4	1.842 8	17.502**	2.935**	4.984**	0.493
15	0.164 2	1.138 6	1.974 2	15.632**	2.473*	4.885**	0.465
20	0.241 4	1.191 7	1.704 2	11.694**	2.472*	4.028**	0.394
25	0.178 4	1.253 9	1.913 9	13.528**	2.536*	4.410**	0.429
28	0.357 2	1.092 5	1.825 0	12.940**	2.316*	4.408**	0.418

根据（1）式的统计结果（表1）表明，两因素与侵蚀模数经幂函数方程拟合，其各级坡度的复相关系数*R*和*F*检验均达到0.01极显著。说明方程的可信度较高，但这只是概括性的结论。至于两个因素*P*、*I*之间是否有差异，还要对这两因素参数进行*t*检验。检验结果表明，*T*₁满足0.05显著水平（5°、10°条件下为极显著水平），*T*₂满足0.01极显著水平，它说明两因素对侵蚀量的贡献度差异不是很大。从表1还可以看出，方程的相关性呈现出一定的变化规律，表现为：随着坡度的增加，其相关性呈下降的趋势。

这个回归方程虽然显著，但由于标准差较大，使得到的复相关系数较低，只维持在0.44左右。统计方程能否反映客观规律将取决于其在实践中的合理性，因为前者是统计意义，后者是专业意义。（1）式在侵蚀意义上并没有完全反映出真实情况，因为采用平均雨强这个指标仅反映出某次降雨的总体特征，并没有反映出其过程集中程度的差

异。

2.1.2 侵蚀量与降雨量及最大30min雨强的关系。为使统计方程能更为准确地反映实际情况, 进一步提高方程的相关性, 解决上述缺陷, 我们采用表征降雨集中程度的最大30min雨强 I_{30} 指标替代(1)式中的平均雨强 I 这个指标, 与降雨量 P 进行组合, 来分析它们对侵蚀强度的影响。即统计方程为:

$$M_s = AP^a I_{30}^b \quad (2)$$

式中: I_{30} ——一次降雨的最大30min雨强 (mm/min);

其余符号意义如前, 下同。

表2 不同坡度条件下侵蚀模数与降雨量及最大30min雨强的统计分析结果

S(°)	A	a	b	F	T ₁	T ₂	R
5	356.87	0.367 0	2.603 6	74.54**	1.503	10.834**	0.805
10	1 820.45	0.262 7	3.046 6	78.16**	0.963	11.349**	0.813
15	7 125.95	0.087 3	3.287 1	71.48**	0.290	11.103**	0.799
20	6 885.71	0.144 5	3.232 3	76.17**	0.501	11.385**	0.809
25	8 023.80	0.186 1	3.324 0	60.99**	0.559	10.144**	0.772
28	10 676.32	0.062 3	3.203 4	64.49**	0.202	10.573**	0.782

从表2的统计检验结果可以看出, 方程的复相关系数 R 与 F 检验值均满足0.01极显著水平。经过对两因素参数的 t 检验表明, 参数 b 的检验大于0.01水平临界值, 为极显著, 而参数 a 的检验水平为不显著。

通过(2)式与(1)式的分析结果和表2与表1的比较可以看出, 式(2)的相关性显著提高, 6级坡度的复相关系数由平均的0.44大幅度地提高到0.80左右, 而在表2中又表明降雨量对侵蚀量的影响作用不大。这说明, 最大30min雨强 I_{30} 指标对侵蚀模数所提供的贡献量足以掩盖降雨量和平均雨强这两个指标的贡献量, 即 I_{30} 指标具有较大的影响作用。因此, 可以认为, 短时段最大雨强 I_{30} 是表征降雨侵蚀力指标重要的潜在参数。

2.1.3 侵蚀量与复合因子 EI_{30} 的关系。早在60年代初, 美国学者威斯奇迈尔(W. H. Wischmeier)^[5,6]通过各种因素在不同的算术排列组合中的复回归分析, 发现选用复合参数 EI_{30} , 即降雨的动能与其最大30min雨强的乘积是反映土壤流失强度的最好指标。我们在对黄土高原有关试验资料的研究中也发现: EI_{30} 是黄土高原目前表征降雨侵蚀力比较适合的指标^[3]。经分析, 复合因子 EI_{30} 也与侵蚀模数呈幂函数相关, 即:

$$M_s = A (EI_{30})^a \quad (3)$$

式中: E ——一次降雨的动能 (J/m^2)。

统计分析结果见表3。从表3可以看出, 各级坡度拟合方程的相关系数平均为0.835, 其中最小为0.814, 最大达0.862。经检验各相关系数远远大于0.01的极显著水平, 这表明方程的可信度极高。

2.1.4 侵蚀量与复合因子 PI_{30} 的关系。复合因子 EI_{30} 与侵蚀量的相关性虽好, 但目前还缺少直接测量雨滴动能的方法。一般都是采用计算的方法求得, 且其计算的工作

表3 不同坡度条件下侵蚀模数与复合因子 EI_{30} 的统计分析结果

S(°)	A	a	r
5	0.036 1	1.417 1	0.862
10	0.029 4	1.602 5	0.856
15	0.036 8	1.650 9	0.829
20	0.051 1	1.629 5	0.831
25	0.042 5	1.702 2	0.822
28	0.075 1	1.593 5	0.814

量较大,加之受地域性差异的影响,使得 EI_{30} 指标在实际应用中有一定的困难性和局限性。有资料地区可借助于动能的经验关系计算动能,而无资料地区的工作却难以开展。我们分析 PI_{30} 的目的就是要研究其在实用中的合理性,借以取代 EI_{30} 指标。其幂函数统计方程如下:

$$M_s = A (PI_{30})^a \quad (4)$$

表4 不同坡度条件下侵蚀模数与复合因子 PI_{30} 的统计分析结果

S(°)	A	a	r
5	1.847 6	1.498 4	0.797
10	2.617 2	1.670 9	0.780
15	3.854 3	1.765 9	0.749
20	4.845 3	1.706 4	0.761
25	5.019 8	1.773 4	0.748
28	6.457 9	1.687 8	0.745

通过对试验数据的统计分析(表4)可以看出,相关系数均大于0.01水平的显著临界值,都在0.74以上,说明该方程仍然具有较高的可信度。

以(4)式与(3)式拟合的相关结果比较表明: PI_{30} 指标对侵蚀模数的相关性比 EI_{30} 指标稍逊一筹,它由6级坡度的平均相关系数0.835降到0.763,两者相差8.62%。造成这种差异的原因在于,(3)式既通过降雨动能 E 在一定程度上反映了降雨过程的变化,又通过 I_{30} 反映了降雨的集中程度;而(4)式除了考虑降雨总量外,主要考虑了降雨的集中程度。但(4)式所提供的贡献价值已能满足侵蚀模数计算精度的要求。这说明,降雨的侵蚀作用主要取决于它的集中性。就黄土高原地区而言,侵蚀性降雨主要表现为高强度短历时的特性,而一次降雨的侵蚀又主要受它的影响。因此,我们认为可以用 PI_{30} 指标取代 EI_{30} 指标,并可在黄土高原地区应用,它为简化计算过程和直接利用降雨资料提供了便利的条件。

2.2 降雨特征对径流深的影响

研究降雨特征与径流深之间的关系是非常复杂的。坡地水流的大小受降雨特征和土壤渗透能力的影响,在同样雨量条件下,土壤的渗透能力若强,则径流量就小,反之,径流量变大。所以,直接以雨量与径流深相关同样得不到理想的结果。黄土高原的降雨产流方式一般属于超渗产流,即当降雨强度超过土壤的入渗率时就产生地表径流。因

此, 当考虑降雨强度后, 降雨特征值的组合因素与径流深之间便存在一定的联系。

2.2.1 径流深与降雨量及平均雨强的关系。经过对 5 年观测期间的 39 次产流降雨资料整理分析, 采用幂函数回归, 即:

$$H_s = AP^a I^b \quad (5)$$

式中: H_s ——某一特定坡度 $S(^{\circ})$ 的一次降雨的径流深 (mm)。

表5 不同坡度条件下径流深与降雨量及平均雨强的统计分析结果

$S(^{\circ})$	A	a	b	F	T_1	T_2	R
5	0.020 9	1.125 5	0.645 7	17.390**	4.821**	3.152**	0.491
10	0.020 1	1.089 9	0.933 2	25.095**	4.943**	4.822**	0.582
15	0.022 6	1.057 4	0.894 3	22.725**	4.732**	4.560**	0.558
20	0.024 3	1.122 0	0.745 9	20.232**	4.947**	3.747**	0.529
25	0.020 8	1.151 4	0.751 6	19.514**	4.891**	3.638**	0.520
28	0.021 4	1.167 8	0.706 9	19.534**	5.023**	3.464**	0.520

表 5 的分析结果表明, 各级坡度的复相关系数 R 与 F 检验值均为极显著, 满足 0.01 水平, 说明统计方程是可信的。经对因素参数的 t 检验表明, T_1 和 T_2 均满足 0.01 极显著水平, 这说明两因素为径流深 H_s 的贡献程度差异不大。与 (1) 式相同, 判断回归方程是否属真, 统计测验提供的概率保证仅仅说明其在统计意义上的可信性, 而其合理性则需要专业知识为其提供理论基础。由于平均雨强概化了降雨过程中不同时段降雨量, 不能代表降雨影响径流的物理机制。即夸大了雨强很小时段的降雨径流作用, 而又缩小了高强度降雨时段的产流能力。这就是造成上式显著性检验满足水平要求, 而复相关系数较低的原因所在。

2.2.2 径流深与降雨量及最大 30min 雨强的关系。最大 30min 雨强 I_{30} 是表征降雨侵蚀力重要的潜在参数, 同样, 它与径流深的关系也是密切的。与 (5) 式相同, 以 I_{30} 替代 I , 得到下列关系式:

$$H_s = AP^a I_{30}^b \quad (6)$$

统计分析结果表明 (表 6), I_{30} 指标对改善方程的相关性具有明显的效果, 其复相关系数 R 和 F 检验值显著提高。由 (5) 式的 6 级坡度平均值 0.53 提高到 (6) 式的 0.80 左右, 并且经对因素参数的 t 检验证实, 最大 30min 雨强 I_{30} 所提供的贡献量优于降雨量和平均雨强这两个指标, 它显著地影响着径流深的量值。这说明, 在一次降雨过程

表6 不同坡度条件下径流深与降雨量及最大 30min 雨强的统计分析结果

$S(^{\circ})$	A	a	b	F	T_1	T_2	R
5	1.381 6	0.687 7	1.340 4	61.85**	4.153**	8.224**	0.775
10	2.643 1	0.615 7	1.489 5	69.31**	3.730**	9.168**	0.794
15	3.546 2	0.557 4	1.556 3	97.534**	3.943**	11.185**	0.844
20	2.309 4	0.655 1	1.438 9	84.346**	4.435**	9.897**	0.824
25	2.118 4	0.676 0	1.463 7	77.887**	4.309**	9.478**	0.812
28	1.663 5	0.720 2	1.378 1	66.167**	4.354**	8.464**	0.786

中,坡面产流主要是由短时段、大雨强所造成的。

2.3 降雨径流对土壤侵蚀的综合影响分析

坡地土壤流失是伴随着降雨径流产生的。当水流的冲刷剪切力超过泥沙的临界剪切应力时,径流侵蚀便发生。降雨径流侵蚀是雨滴击溅力和坡面径流势能转化为冲刷动能的共同作用,以及雨滴对径流附加扰动作用的结果。根据6级试验坡度,39次产流降雨观测获得的234个样本资料,经回归分析建立的一次降雨侵蚀统计模型为:

$$M = -380.953 + 6.805 \cdot 2E_p + 0.0327E \quad (7)$$

式中: M ——一次降雨侵蚀量 (t/km^2);

E_p ——径流势能 (J/m^2)。

对上式的统计检验结果表明,方程的复相关系数 $R = 0.932$, F 值为 1587.1^{**} , 回归方程的可信度达到高度显著水平 (在 0.01 水平上显著)。因此,本式具有较高的估算精度。由于降雨动能 E 与径流势能 E_p 这两个变量之间没有较为明显的相关关系,因此,可对这两个变数的个体进行 F 检验,通过 F 值大小可以比较各个因素对因变量作用的影响程度。结果表明: $F_1 = 3174.1^{**}$, 在 0.01 水平上高度显著, $F_2 = 0.0332$, 作用不显著。这说明,雨滴动能的作用远远小于由于径流势能转换为动能同时通过径流搬运泥沙而流失的作用。径流势能 E_p 是径流深、坡度和坡长的函数,它本身就综合地反映了降雨、地形和下垫面等因素对侵蚀量的影响。因此,径流势能在坡地侵蚀过程中具有非常重要的地位,同时也间接地表明研究土壤侵蚀规律中定量评价的复杂性。

3 结 论

根据野外天然降雨侵蚀试验资料分析,得出下列几点认识和结论:

3.1 从降雨特征值与侵蚀量之间的几个表达式中分析得出,影响土壤侵蚀的降雨特征值其重要程度依次为:降雨动能与最大30min雨强乘积 EI_{30} ,降雨总量与最大30min雨强乘积 PI_{30} ,最大30min雨强,平均雨强和降雨量。其中 EI_{30} 是与土壤侵蚀量关系最为密切的指标。

3.2 以复合参数 PI_{30} 取代 EI_{30} ,虽然相关性有所降低,但仍能满足侵蚀量计算精度的要求,并在 0.01 水平上显著。显然采用 PI_{30} 指标是合理而实用的,它为简化计算过程和直接利用降雨资料提供了便利的应用条件。我们认为,该指标在黄土高原其它地区也是较为适合的。

3.3 通过裸露地条件下的试验资料采用回归分析,建立了反映降雨径流影响侵蚀的综合统计模型。其中表明,径流势能 E_p 对侵蚀量具有极其重要的影响作用。该式具有较高的计算精度。这为进一步研究坡地水蚀及其机理和进行土壤侵蚀定量评价提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] 刘善建:天水站水土流失测验与分析,《科学通报》,1953
- [2] 王万忠:黄土地区降雨特征与土壤流失关系的研究,《水土保持通报》,第4~5期,1983
- [3] 江忠善等:黄土高原土壤流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究,《中国科学院西北水土保持研究所集刊》,第7集,1988

- [4] 陈永宗等著:《黄土高原现代侵蚀与治理》,第80~90页,科学出版社,1988
[5] N·W·哈德森著,窦葆璋译:《土壤保持》,第50~52页,科学出版社,1975
[6] M·J·柯克比、R·P·C·摩根编著,王礼先等译:《土壤侵蚀》,第28~32页,水利电力出版社,1987
[7] 中国科学院数学研究所:《常用数理统计方法》,科学出版社,1973

Study on Relationship Between Rainfall Characteristics and the Loss of Soil and Water

Jia Zhiwei Jiang Zhongshan Liu Zhi

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation
Under Academia Sinica and the Ministry of Water Conservancy)

Abstract

On the base of data obtained from field experiment plots under natural rain, the relationship between composite factors of rainfall characteristics and soil erosion is studied with statistical analysis methods in this paper. First the soil erosion amount is closely related to the combination of rainfall energy and maximum 30 minutes rainfall intensity (EI_{30}), also the more simple index of multiplication of rainfall amount and the maximum 30 minutes rainfall intensity (PI_{30}) can meet the prediction accuracy need for erosion. After the mathematical model of soil erosion reflecting the comprehensive effects of both rainfall and runoff are established, the result also shows that runoff potential energy has a more important effect on soil erosion.

Key words: Rainfall characteristics, Slope land, Soil and water loss

(Abstract presented article from page 50 to 58)

Application of USLE in Loessial Gully Hill Area

Sun Baoping Zhao Tingning Qi Shi

(Dept. of Soil Conservation, Beijing Forestry University)

Abstract

A new method and computer program were developed out to calculate amount of soil loss of small watershed based on the USLE (Universal soil Loss Equation), by which amount of soil loss of Huangjia-Ercha small watershed in Xiji county was calculated, and there is nearly no difference between the calculating value and value investigated on site. This method and the values of factor of USLE can be used in other similar regions.

Key words: Small watershed, Amount of soil loss