

# 沈阳地区天然降雨雨滴特征对坡面产沙量的影响

盛世博<sup>1</sup>, 王瑄<sup>1</sup>, 盛思远<sup>2</sup>, 张凯<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2. 鞍山市千山区水资源办公室, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:**为了探究沈阳地区天然降雨雨滴特征与产沙量的关系,在天然降雨条件下,使用滤纸色斑法计算雨滴特征,利用野外径流小区(长8 m,宽1 m)采集沙样。运用相关分析法、灰色关联分析法和模糊贴近度分析法分析了降雨强度、雨滴动能、雨滴中值粒径、雨滴终点最大速度和雨滴质量与产沙量的关系。结果表明:经过相关分析和灰色关联分析,影响坡面产沙量的顺序为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径>最大雨滴终点速度>雨滴质量,模糊贴近度分析表明降雨强度对坡面产沙量的影响最大,降雨动能其次,雨滴质量影响最小。坡面产沙量分别与降雨强度、雨滴中值粒径、雨滴动能呈幂函数关系;天然降雨雨滴中值粒径与降雨强度呈幂函数关系;雨滴中值粒径和雨滴质量是雨滴动能的主要影响因素。

**关键词:**雨滴;坡面产沙量;相关分析;灰色关联;模糊贴近度

**中图分类号:**S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)02-0012-05

## Influence of Natural Rainfall on Slope Sediment Yield in Shenyang Region

SHENG Shibo<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, SHENG Siyuan<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Water Resources Office of Qianshan District in Anshan, Anshan, Liaoning 114000, China)

**Abstract:** This article aims at analyzing the relationship between sediment yield and different raindrop characteristics based on natural rainfall in Shenyang Region. Within natural rainfall, the runoff plots (8 m in length and 1 m in width) had been used to collect sediment samples, and the raindrop characteristics were calculated based on filter paper splash procedure. The relationship between sediment yield, raindrop quality and rainfall intensity, the kinetic energy of raindrops, raindrop median diameter, the maximum terminal velocity of raindrops were analyzed respectively by correlation analysis, gray relative analysis method and nearness degrees analysis. Results of correlation analysis and gray relative analysis were same, which followed the order: rainfall intensity>raindrop kinetic energy>raindrop mean diameter>maximum raindrop terminal velocity>raindrop quality; while the nearness degrees analysis showed that rainfall sediment yield on the slope was mostly affected by rainfall intensity, followed by raindrop kinetic energy and raindrop quality being came next; There was a power function relationship between sediment yield and rainfall intensity,  $D_{50}$ , kinetic energy of raindrops respectively, and it was the same relation between the raindrop mean diameter of natural rainfall and rainfall intensity; raindrop mean diameter and raindrop quality were the main two influencing factors on the raindrop kinetic energy.

**Keywords:** raindrop; sediment yield; correlation analysis; gray relative analysis; nearness degrees analysis

天然降雨雨滴对坡面的击溅作用是坡面产生水土流失的影响因素之一。天然降雨由密集的雨滴组成,因此不同的雨滴速度、直径、质量、动能及降雨强度均对次降雨坡面产沙量有较大影响。沈海欧等<sup>[1]</sup>模拟降雨条件下纱网覆盖对雨滴打击作用的影响,研究表明在有雨滴打击的条件下产沙量显著增高。刘

彦辰等<sup>[2]</sup>运用了灰色关联、模糊贴近度等方法,分析了土壤剥蚀率与其侵蚀因子的关系,表明了这两种数学方法在水土保持方面的适用性。姚文艺等<sup>[3]</sup>采用雨滴谱率定直径的方法,探究了雨滴中值粒径、降雨动能和降雨强度的关系,并推导出了雨滴终点速度的计算公式,提供了计算雨滴特征值的方法。黄炎

和<sup>[4]</sup>、李振新<sup>[5]</sup>等分别对雨滴直径、雨滴分布、雨滴终点速度和雨滴动能进行了计算,并将降雨量对土壤侵蚀量的影响进行了研究。马廷等<sup>[6]</sup>通过雨滴谱函数改变雨滴形状参数对不同类型降雨动能提出计算方法。综上所述,探究天然降雨雨滴特征与产沙量的关系,是探究土壤侵蚀和水动力学的基础。国内研究对天然降雨雨滴分布以及雨滴特征的研究较为普遍,对雨滴特征与坡面产沙量的关系分析较少。本文在天然降雨条件下的野外径流小区进行试验,对降雨特征因素与坡面产沙量的关系进行相关分析、灰色关联分析和模糊贴近度分析。研究雨滴特征对坡面侵蚀的主要影响因子,以期对坡面土壤侵蚀防治与预测提供理论参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验区概况

试验于 2015 年、2016 年在沈阳农业大学综合试验基地水土保持室外径流小区进行。该试验场地位于沈阳市沈河区,气候属于半湿润温带大陆气候,年平均降水量 722 mm,最大月份为 7 月份,平均降水量 183 mm,最小月份为 1 月份,平均降水量 7 mm。径流小区水平投影长 8 m,宽 1 m,坡度为 15°,试验土壤为棕壤,设置 4 组坡面。

### 1.2 试验方法

本试验坡面产沙量确定使用积流桶进行收集,收集结束后静置 24 h,使土样充分沉淀,对土样进行烘干称重,计算坡面产沙量,取 4 组坡面产沙量平均值为最终产沙量。

本试验雨滴测定采用滤纸色斑法,将曙红和滑石粉粉末按 1:10 的重量比混合均匀,用刷子将曙红和滑石粉粉末均匀地涂抹在滤纸上,将其固定于有可抽动盒盖的矩形塑料盒内;取样时,将取样盒移动至径流小区,将盒盖迅速打开,待收集完毕后迅速将盖关上,每次用时约 1~2 s。同一时间取样 3 次,然后将滤纸取出,用千分之一卡尺测定色斑直径。

1.2.1 雨滴中值粒径计算 使用内差法计算雨滴中值粒径( $D_{50}$ ),雨滴直径不仅与色斑直径存在关系,同时也与滤纸的性能有关。其关系式为:

$$d = \left( \frac{3D^3h}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: $d$  为雨滴直径(mm); $D$  为雨滴色斑直径(mm); $h$  为滤纸厚度(mm)。

1.2.2 雨滴质量计算 雨滴质量可根据公式计算,其关系式为:

$$m = \frac{1}{6} \pi \rho d^3 \quad (2)$$

式中: $m$  为雨滴质量(mg); $d$  为雨滴直径(mm); $\rho$  为水的密度(mg/mm<sup>3</sup>)。

1.2.3 雨滴终点速度计算 本文雨滴终点速度计算采用姚文艺研究得出的雨滴终速计算公式,该公式较其他公式结构简单,并且模拟精度较其他公式高。公式为:

当  $0 < d \leq 3$  mm 时

$$v_m = \sqrt{(38.9 \frac{v}{d})^2 + 2400gd} - 38.9 \frac{v}{d} \quad (3)$$

当  $3 \text{ mm} < d \leq 6$  mm 时

$$v_m = \frac{d}{0.113 + 0.0845d} \quad (4)$$

式中: $v_m$  为雨滴终点速度(m/s); $d$  为雨滴直径(mm); $v$  为空气运动粘滞系数(cm<sup>2</sup>/s); $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>)。

1.2.4 雨滴动能计算 雨滴动能的计算并没有理想的仪器可以直接计算雨滴动能,只能通过雨滴谱对雨滴动能进行计算,计算式为:

$$e = \frac{1}{12} \pi \rho d^3 V^2 \quad (5)$$

式中: $e$  为单个雨滴的动能(J); $\rho$  为雨滴的密度(kg/mm<sup>3</sup>); $d$  为单个雨滴直径(m); $V$  为单个雨滴的体积(m<sup>3</sup>)。

根据公式,可以推求单个雨滴的雨滴动能,将每个雨滴质量相加,得出滤纸上全部雨滴的总动能。将雨滴总质量除以滤纸的面积和水的密度得出降雨深,雨滴总动能除以降雨深和滤纸面积,求出单位面积上的雨滴动能。

### 1.3 数据分析方法

试验数据的相关性处理选用 SPSS 和 Excel 进行处理。本试验研究选用灰色关联和模糊贴近度的分析方法对数据进行处理,灰色关联度分析就是对数据序列几何相似度的判断,数据序列相似度越高,关联度越大;几何相似度越高,关联度越大,反之则关联度越小。计算公式为:

$$Y[x_0(k), x_i(k)] = \frac{x_{\min} + \rho x_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho x_{\max}} \quad (6)$$

式中: $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ ;  $x_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{oi}(k)$  和  $x_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)$  是比较序列和参考序列的绝对差值的最小值和最大值。

模糊贴近度衍生于模糊数学,是在模糊数学的基础上提出的贴近理论,是对两个序列接近程度的分析,本试验选择 4 种模糊贴近度(海明贴近度、欧几里德贴近度、最大最小贴近度、算术平均贴近度)进行分析,其公式分别为:

海明贴近度  $\sigma_H$

$$\sigma_H(C_j,D_k)=1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m|c_{ij}-d_{ik}| \tag{7}$$

欧几里德贴近度  $\sigma_E$

$$\sigma_E(C_j,D_k)=1-\frac{1}{\sqrt{m}}[\sum_{i=1}^m(c_{ij}-d_{ik})^2]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

最大最小贴近度  $\sigma_M$

$$\sigma_M(C_j,D_k)=\frac{\sum_{i=1}^m(c_{ij}\cup d_{ik})}{\sum_{i=1}^m(c_{ij}\cap d_{ik})} \tag{9}$$

算术平均贴近度  $\sigma_A$

$$\sigma_A(C_j,D_k)=\frac{2\sum_{i=1}^m(c_{ij}\cap d_{ik})}{\sum_{i=1}^m(c_{ij}+d_{ik})} \tag{10}$$

由于各数据并非单位统一,具有相同量纲,因此

在对数据分析前需要对其进行初值化,模糊贴近度初值化公式如下:

$$Y_{ij}=\begin{cases} 0 & X_{ij}=\min_i X_{ij} \\ \frac{X_{ij}-\min_i X_{ij}}{\max_i X_{ij}-\min_i X_{ij}} & \min_i X_{ij}<X_{ij}<\max_i X_{ij} \\ 1 & X_{ij}=\max_i X_{ij} \end{cases} \tag{11}$$

2 结果与分析

2.1 雨滴特征相关分析

选取两年共 18 场降雨,并计算其雨滴特征和降雨强度,计算坡面产沙量,结果见表 1。采用双变量相关分析法对降雨强度、 $D_{50}$ 、最大雨滴终点速度、雨滴动能、雨滴质量和坡面产沙量进行相关分析,结果见表 2。

表 1 雨滴特征与坡面产沙量

序号	日期	降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	$D_{50}$ / mm	最大雨滴终点 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	雨滴动能/ (J·m <sup>2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	雨滴 质量/g	坡面 产沙量/kg
1	2015.6.5	0.72	2.33	7.35	24.67	0.9372	6.21
2	2015.6.26	0.89	2.54	8.01	26.85	1.0131	6.17
3	2015.7.2	0.77	2.41	7.73	23.99	0.9237	6.37
4	2015.7.7	0.69	2.57	7.02	21.57	0.8481	5.39
5	2015.7.31	0.55	2.58	7.99	21.89	0.8581	4.23
6	2015.8.2	0.42	1.54	6.21	17.76	0.7290	1.27
7	2015.8.7	0.48	1.77	6.73	18.83	0.7624	1.79
8	2015.8.17	0.22	0.97	2.29	11.27	0.5262	0.93
9	2016.6.12	0.63	1.77	6.21	23.56	0.9103	3.29
10	2016.6.17	0.9	3.1	9.34	30.12	1.0134	6.39
11	2016.6.27	0.53	2.37	8.32	19.55	0.7849	3.22
12	2016.7.15	0.75	2.74	7.44	21.85	0.8568	4.32
13	2016.7.19	0.49	2.14	5.32	16.67	0.6949	1.29
14	2016.7.23	0.73	3.09	8.62	23.82	0.9184	3.27
15	2016.7.24	0.84	2.86	7.73	26.59	1.379	3.88
16	2016.7.25	0.63	2.17	7.01	21.54	1.297	2.39
17	2016.7.27	0.88	2.9	9.08	27.55	1.444	4.22
18	2016.8.2	0.46	2.15	7.48	13.79	0.784	2.32

表 2 Pearson 相关系数矩阵

项目		降雨强度	$D_{50}$	最大雨滴 终点速度	雨滴动能	雨滴质量	坡面产沙量
降雨强度	相关性	1.000	0.844**	0.775**	0.945**	0.743**	0.811**
$D_{50}$	相关性		1.000	0.868**	0.754**	0.577*	0.672**
最大雨滴终点速度	相关性			1.000	0.749**	0.593**	0.628**
雨滴动能	相关性				1.000	0.758**	0.769**
雨滴质量	相关性					1.000	0.383
坡面产沙量	相关性						1.000

\* \*. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。\*, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

从表 2 中可以看出,坡面产沙量与降雨强度、 $D_{50}$ 、最大雨滴终点速度、雨滴动能的相关性均达到显著水平,坡面产沙量与降雨强度的相关性最大,达到了 0.811;雨滴动能和雨滴中值粒径其次,分别为 0.769,

0.672;与最大雨滴终点速度相关性较小,为0.628;与雨滴质量的相关性最低,仅有0.383,相关性不显著。降雨强度、 $D_{50}$ 、最大雨滴终点速度、雨滴动能和雨滴质量的相关性均达到显著相关水平,其中降雨强度与雨滴动能的相关性最高,为0.945。各因子对于坡面产沙量总体相关系数顺序为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径( $D_{50}$ )>最大雨滴终点速度>雨滴质量。

2.2 雨滴特征灰色关联分析

选取坡面产沙量为参考序列  $Y_0$ ,选取降雨强度、 $D_{50}$ 、最大雨滴终点速度、雨滴动能和雨滴质量作为比较数列  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ ,根据灰色关联理论,首先对数据进行初值化,将每列数据均除以该列数据的第一个数,完成后使用公式(6)计算各雨滴特征对  $Y_0$  的关联系数,见表3。

由表3可以看出,各个影响因子,  $x_1$  与  $Y_0$  的关联度最大,为0.751;其次为  $x_4$ ,关联度为0.714。即降雨强度与坡面产沙量关系最为密切,对坡面产沙量影响最大。雨滴动能次之,并且降雨强度的灰色关联度远大于雨滴动能。5种因素总体的灰色关联度为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径( $D_{50}$ )>最大雨滴终点速度>雨滴质量。

灰色关联度与相关分析对雨滴特征与坡面产沙量关系的分析结果相一致,这说明在天然降雨条件下,雨滴特征与次降雨坡面产沙量有密切的关系,降雨强度和雨滴动能对次降雨坡面土壤产沙的影响最

大。天然降雨降雨强度对坡面面蚀影响较大,雨滴动能对坡面溅蚀影响较大,雨滴直径、雨滴质量和雨滴终点速度同样对降雨强度和雨滴动能有所影响。

表 3 雨滴特征灰色关联度计算结果

序号	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$x_4(k)$	$x_5(k)$
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	0.664	0.673	0.710	0.748	0.906
3	0.904	0.756	0.808	0.859	0.930
4	0.690	0.674	0.728	0.693	0.841
5	0.774	0.969	0.831	0.781	0.986
6	0.827	0.727	0.701	0.875	0.710
7	0.659	0.603	0.493	0.537	0.465
8	0.678	0.609	0.507	0.568	0.490
9	0.848	0.730	0.820	0.665	0.548
10	0.771	0.890	0.751	0.629	0.542
11	0.914	0.635	0.539	0.757	0.626
12	0.823	0.686	0.790	0.902	0.728
13	0.599	0.481	0.552	0.563	0.484
14	0.653	0.483	0.524	0.619	0.535
15	0.636	0.590	0.673	0.622	0.375
16	0.622	0.582	0.546	0.570	0.333
17	0.647	0.622	0.592	0.640	0.372
18	0.803	0.578	0.509	0.827	0.525
灰色关联度	0.751	0.683	0.671	0.714	0.633

2.3 雨滴特征模糊贴近度分析

根据公式(11)对数据进行初值化处理,根据公式(6)——(10)计算雨滴特征( $X$ )对坡面产沙量( $Y$ )的模糊贴近度,计算结果见表4。

表 4 雨滴特征对坡面产沙量模糊贴近度分析结果

项目	降雨强度( $x_1$ )	$D_{50}$ ( $x_2$ )	雨滴终点最大速度( $x_3$ )	雨滴动能( $x_4$ )	雨滴质量( $x_5$ )
海明贴近度	0.8907	0.8081	0.7867	0.8465	0.7439
欧几里德贴近度	0.8825	0.7839	0.7793	0.8395	0.7298
最大最小贴近度	0.8034	0.6593	0.7084	0.7793	0.5104
算术平均贴近度	0.8478	0.7763	0.7947	0.8395	0.6684

从表4可以看出,降雨强度与坡面产沙量的4种贴近度的计算结果均大于其他的影响因子,与坡面产沙量的接近程度最大,也就是说降雨强度与坡面产沙量的发展趋势最接近。雨滴动能的4种贴近度居第二位,与坡面产沙量的发展趋势相似程度仅次于降雨强度居第二位。雨滴动能的贴近度与降雨强度的贴近度数值较为接近,说明二者发展趋势较为接近。雨滴中值粒径的海明贴近度和欧几里德贴近度大于雨滴终点最大速度,而最大最小贴近度和算术平均贴近度小于雨滴终点速度,因此雨滴终速直径和雨滴终点最大速度对坡面产沙量的影响无法判断。雨滴质量的4种贴近度均小于其他因子,因此雨滴质量与坡面产沙量的接近程度最低。

结合以上分析,坡面产沙量的主要影响因子为降雨强度、雨滴动能和雨滴中值粒径。对主要影响因子

与坡面产沙量进行回归拟合,其分析结果见表5。

表 5 主要影响因子与坡面产沙量回归分析结果

雨滴特征与坡面产沙量的关系	回归方程	决定系数( $R^2$ )
降雨强度	$y=6.5996x^{1.4658}$	$R^2=0.8193$
$D_{50}$	$y=0.8824x^{1.5761}$	$R^2=0.6918$
雨滴动能	$y=0.0065x^{2.038}$	$R^2=0.7642$

表5的回归分析结果表明,坡面产沙量与降雨强度、 $D_{50}$ 和雨滴动能的关系遵守  $y=a^b$ ,  $a>0(a, b$  为系数)的幂函数分布规律。对相关性最高的雨滴动能和降雨强度进行线性回归拟合,其关系式为:

$$E=18.376I+9.6206 \quad (R^2=0.9441) \quad (12)$$

式中: $E$ 为雨滴动能 [ $J/(m^2 \cdot mm)$ ]; $I$ 为降雨强度 (mm/min),由公式(12)可以看出,雨滴动能与降雨强度之间呈线性相关。USLE中采用的降雨强度与

雨滴动能的关系式为对数形式,因此对雨滴动能和降雨强度进行曲线拟合。

$$E=7.277\lg I+30.069 \quad (R^2=0.899) \quad (13)$$

由于数据选取和地区降雨因素制约,公式(13)与USLE中采用的关系式系数有所差异,曲线拟合的优合度小于直线拟合,因此选用线性回归对雨滴动能和降雨强度进行拟合。

对雨滴中值粒径  $D_{50}$  和降雨强度  $I$  进行回归拟合,其关系式为

$$D_{50}=3.7138I^{0.9617} \quad (R^2=0.9205) \quad (14)$$

由公式(8)可以看出,天然降雨雨滴中值粒径与降雨强度呈现幂函数关系,随着降雨强度增大,雨滴中值粒径增大,该结论与尚佰晓<sup>[7]</sup>和吴光艳<sup>[8]</sup>等得出的结论所一致。

将雨滴中值粒径( $d$ ),雨滴质量( $m$ )和雨滴终点最大速度( $v$ )对雨滴动能( $E$ )进行线性拟合,分析这3种影响因素对雨滴动能的结果,雨滴中值粒径和雨滴质量进入方程,方程如下:

$$E=9.477+2.89d+5.98m \quad (15)$$

其中  $d$  的  $\beta$  值为 0.635,而  $m$  的  $\beta$  值为 0.362。这说明雨滴中值粒径和雨滴质量对雨滴动能的影响最大,其中雨滴中值粒径对雨滴动能的影响占 63.5%,影响最为突出。天然降雨雨滴动能的变化与雨滴直径的变化联系最紧密。

对3种分析方法进行比较,相关性分析、灰色关联分析关于各影响因子对坡面产沙量的分析结果一致,影响大小依次为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径( $D_{50}$ )>最大雨滴终点速度>雨滴质量。模糊贴近度分析的海明贴近度与欧几里德贴近度分析结果与相关性分析和灰色关联分析的结果相同,最大最小贴近度和算术平均贴近度的分析结果对雨滴中值粒径和最大雨滴终点速度对坡面产沙量的贴近程度无法判断,对于与坡面产沙量发展相似程度最高的降雨强度,排名第二的雨滴动能和相似程度最低雨滴质量的分析结果与相关分析和灰色关联相同。因此,降雨强度与坡面产沙量的发展相似程度最高,雨滴动能其次,雨滴质量最小。降雨强度和雨滴动能是坡面产沙量的主要影响因素,这与尚佰晓<sup>[9]</sup>和王瑄<sup>[10]</sup>等得出的结论相似。前者采用次降雨过程线与产沙过程线对比的方法分析雨强与坡面产沙量的关系,数据存在偶然性,本文选取多次降雨进行分析,数据误差小。目前,坡面侵蚀方面的研究主要集中在室内研究,室内人工降雨雨滴大小较为均匀,与天然降雨雨滴大小分布有较大差别,使同降雨强度条件下雨滴动能不同<sup>[11]</sup>。因此人工降雨条件得出的结论在天然降雨条件下是

否试用有待验证。本研究旨在分析天然降雨条件下,雨滴对坡面侵蚀的影响,具有实际应用价值。

### 3 结论

(1) 相关分析结果表明,坡面产沙量与降雨强度、雨滴中值粒径、最大雨滴终点速度、雨滴动能对坡面产沙量相关系数顺序为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径( $D_{50}$ )>最大雨滴终点速度,相关性达到显著水平。

(2) 灰色关联结果表明,5种因素总体的灰色关联度排序为降雨强度>雨滴动能>雨滴中值粒径( $D_{50}$ )>最大雨滴终点速度>雨滴质量。

(3) 模糊贴近度结果表明,降雨强度与坡面产沙量的发展趋势最为接近,降雨动能其次,雨滴质量与坡面产沙量的发展趋势相似程度最小。雨滴中值粒径的海明贴近度、欧几里德贴近度大于最大雨滴终点速度,欧几里德贴近度、算术平均贴近度小于最大雨滴终点速度,因此二者关系无法判断。

(4) 坡面产沙量与降雨强度、 $D_{50}$ 、雨滴动能的关系遵守的幂函数分布规律。天然降雨雨滴中值粒径与降雨强度同样遵循幂函数关系。雨滴中值粒径和雨滴质量为雨滴动能的主要影响因子,雨滴中值粒径对雨滴动能的影响占 63.5%,为主要影响因素。

#### 参考文献:

- [1] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112.
- [2] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率主要影响因素分析[J].水土保持研究,2016,23(2):1-5.
- [3] 姚文艺,汤立群.水利侵蚀产沙过程及模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2001.
- [4] 黄炎和,朱鹤健,郑达贤.闽南地区的土壤侵蚀与治理[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [5] 李振新,欧阳志云,郑华,等.卧龙地区针叶林及亚高山灌丛对降雨的雨滴谱及能量的影响[J].水土保持学报,2004,18(4):125-129.
- [6] 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.
- [7] 尚佰晓,王瑄,陶伟,等.沈阳市天然降雨雨滴特征研究[J].水土保持研究,2008,15(6):139-141.
- [8] 吴光艳.陕西杨凌人工林内外天然降雨雨滴特性[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [9] 尚佰晓,王莉,王瑄,等.坡面土壤剥蚀率及其与水流含沙量的关系研究[J].水土保持学报,2009,23(2):28-31.
- [10] 王瑄,赵茜.不同坡度下侵蚀量与降雨特征的关系研究[J].沈阳农业大学学报,2014,45(2):190-194.
- [11] 吴光艳,郝民利,刘超群.天然降雨与人工降雨特性的研究[J].人民珠江,2013(2):5-7.