

降雨能量对水土流失的影响研究进展

舒若杰

(广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘要: 降雨是导致土壤流失的动力因素,降雨侵蚀力反映由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,准确计算降雨侵蚀力是定量预报土壤流失的重要环节。本文回顾了国内外降雨能量及其侵蚀力研究现状、进展、降雨雨谱测定、降雨能量及侵蚀力计算方法、降雨与产流产沙的关系,归纳总结了降雨与降雨侵蚀力的研究方法,并根据降雨地域性差异较大的特点,推荐了适用于我国的降雨侵蚀力及降雨能量计算公式。

关键词: 降雨能量; 水土流失; 土壤侵蚀; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0196-05

Research progress of influence of rainfall energy on soil and water loss

SHU Ruojie

(Guangdong Provincial Investigation, Design and Research Institute of Water Conservancy
and Electric Power, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Rainfall is considered as a dynamical factor causing the soil erosion, and rainfall erosivity can reflect the potential ability of soil erosion by rainfall. So the accurate calculation of rainfall erosivity is an important process for quantitative forecast soil erosion. In this paper, the research actuality and progress of rainfall capacity and erosivity, raindrop spectrum measurement, the calculation methods for rainfall capacity and erosivity, the relationship of rainfall and sediment were summarized. Furthermore, the calculation formulas of rainfall erosivity and capacity that are suitable in China were proposed according the regionalism characteristics of rainfall.

Key words: rainfall energy; soil and water loss; soil erosivity; runoff and sediment production

1 降雨能量特征的表述与计算

降雨是导致水土流失的动力因子,降雨侵蚀力反映由降雨引起水土流失的潜在能力、气候因素对水力侵蚀的作用。准确评估计算降雨侵蚀力对定量预报水土流失具有重要意义。

郭耀文、付炜、夏艳华、章文波等人^[1-4]通过大量研究证实了降雨侵蚀力与降雨能量有关,多数拟定的降雨侵蚀力指标都包含降雨动能因子,并提出了不同的计算降雨动能方程或降雨动能计算方法。但由于单个雨滴所蕴含的能量非常小,以致使用灵敏度很高的仪器进行测量时,都可能被风等其它因素影响所掩盖,即直接测量雨滴动能比较困难。我国江忠善等(1983)^[5]利用色斑法收集了黄土高原天水、绥德、西峰和离石等4站的雨滴资料,分别拟合出黄土高原断点雨强与动能的关系式。黄炎和、周伏建、谢云等也分别在福建安溪、福建省、云南滇东北等地建立了区域性降雨动能估算公式^[6-8]。

1.1 降雨雨谱测定方法

降雨雨谱的分布直接决定降雨侵蚀能量的大小,降雨雨谱包括雨滴组成分布、降落速度和雨滴动能等。雨滴直径的大小,决定了降落雨滴的质量和速度的大小,从而决定了雨滴所具有动能的大小。只要测得降雨的雨滴大小及其组成分布,就可以得出降雨雨谱特性参数,并用前人^[5,9]的一些结论来推算出降雨侵蚀力。当前常见的测定雨滴大小的方法有雷达观测法、摄影法、浸入法、面粉团法和滤纸色斑法。

(1) 雷达观测法:此法可实时、大面积地观测包括雨滴粒径及其分布在内的一些降雨基本特性,一般在气象方面用于天然降雨的观测,不适合人工降雨等实验研究;

(2) 摄影法:摄影法是实验室内观测人工模拟降雨的一种较为常用的方法,观测中,先用高速摄影机拍摄出正在下落中的雨滴的相片,然后在显微镜下量测出该雨滴的粒径。摄影法能方便准确的测出

降雨的雨滴大小与分布情况,但高速摄影仪价格昂贵,在一般降雨试验中很难使用。

(3) 浸入法:浸入法是用盛有油料的容器接盛雨滴,通过测量油中水珠直径来确定雨滴的大小。由于油与水不融合,且油比水轻,因此落入油中的雨滴因表面张力的作用而变成球形水珠,这样就可直接测量出该雨滴的直径。浸入法适用于测量粒径较小的雾滴或雨滴,对大雨滴不适用。

(4) 面粉团法:面粉团法是用盛有面粉的容器接盛雨滴,雨滴渗入面粉形成面粉团,然后通过测量面粉团的重量来确定雨滴的大小。面粉团烘干后的重量与雨滴粒径之间的关系可以预先率定,于是通过称量每次降雨后面粉团的烘干重量即可求出相应雨滴粒径的大小。面粉团法所需的测量仪器成本低廉,测量成果较可靠,它适用于高强度的降雨,但每次测量中都须让面粉球在取样器中自然风干一天,然后放在烘箱内 105°条件下烘 48 h,并在高精度电子天平逐级称量,在野外使用很不方便,且不适用于测量粒径太小的雨滴。

(5) 滤纸色斑法:该方法是历史悠久、应用最广泛的一种雨滴粒径测量方法。该法是基于“水滴在同一材料上形成的色斑大小与水滴的粒径大小成正比”的假定,预先率定好水滴粒径与色斑粒径之间的关系,然后通过量测雨滴在相同材料上形成的色斑大小推知相应的雨滴粒径。文献[10-12]详细介绍了色斑法的应用,该法可以观测到粒径极小的雾滴,国内多采用此方法间接推算雨滴直径来了解雨谱特性,并拟合出雨滴谱分布关系曲线。

1.2 雨滴落速研究

雨滴在降落过程中,受到重力与空气阻力的共同作用。当这两种力达到平衡时,雨滴以匀速降落,称作雨滴终速。在达到终速前,雨滴的降落速度则随高度而变化。天然降雨雨滴由高空落下,都达到终速。雨滴落速是降雨侵蚀力的研究的一个重要指标,是人工模拟降雨跟天然降雨相似性研究的重要因子。

雨滴在空中垂直下落的运动方程为:

$$ma = mg - F \tag{1}$$

式中: m 为雨滴质量; a 为垂直下落加速度; g 为重力加速度; F 为阻力。不考虑雨滴下落过程的蒸发和碰撞引起的质量变化,(1) 式可以写成

$$m \frac{dv}{dt} = mg - F \tag{2}$$

研究表明^[9,13],对于 $0.2 \mu m \leq d < 100 \mu m$ 的小雨滴,降落过程所受阻力主要为粘滞阻力,遵循

Stokes 阻力定律,即

$$F = 3\pi\mu vd \tag{3}$$

式中: μ 为空气动力粘滞系数; d 为单个雨滴直径。将该研究成果代入(2) 式,有

$$m \frac{dv}{dt} = mg - 3\pi\mu vd \tag{4}$$

当下落加速度 $\frac{dv}{dt} = 0$ 时,可得终速公式:

$$V_m = \frac{mg}{3\pi\mu d} \tag{5}$$

当 $d \geq 0.19 \text{ mm}$ 时,国内大多用修正的牛顿公式^[5,14,15]:

$$V_m = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d} \tag{6}$$

当 $d < 0.19 \text{ mm}$ 时,雨滴终速大多采用修正的沙玉清公式计算:

$$V_m = 0.496 \times 10^x \tag{7}$$

式中: $x = \sqrt{28.32 + 6.524 \lg(0.1d) - (\lg 0.1d)^2} - 3.665$ 。

各国对雨滴下落速度计算的公式有很多,文献[9] 对各家公式的精度及其结构进行总结证明,推荐使用如下单个雨滴终速公式

$$v_m = \sqrt{(38.9 \frac{v}{d})^2 + 2400gd} - 38.9 \frac{v}{d} \tag{8}$$

$0 < d \leq 3 \text{ mm}$

$$v_m = \frac{d}{0.113 + 0.0845d} \tag{9}$$

$3\text{mm} < d \leq 6\text{mm}$

1.3 降雨能量计算

跟水土流失有关的降雨能量主要为降雨动能,雨滴大小及单个雨滴速度用上述方法测定或计算。假设以匀速 v 运动的物体所具有的动能为 e ,则单个雨滴 e 的计算公式为:

$$e = mv^2/2 \tag{10}$$

式中: m 为物体的质量, g 。对于直径为 $d(\text{cm})$ 、密度为 $\rho(\text{g/cm}^3)$ 的一颗雨滴,其动能为

$$e = (\pi d^3 \rho v^2)/12 \tag{11}$$

上式是单个雨滴动能计算,对一场降雨,可以通过取样并对样方内各雨滴动能求和,最终推算出次降雨降雨能量。

2 降雨侵蚀力的表述与计算

2.1 降雨侵蚀力(R)表述

反映次降雨侵蚀能力大小的降雨侵蚀力指标是进行侵蚀力计算的基础。次降雨即一次降雨,修订通

用土壤流失方程 RUSLE 中给出的划分标准是:降雨间歇时间在 6 h 以上、或连续 6h 降雨量不足 1.2 mm, 则视为二次降雨事件, 否则看作一次降雨事件。尽管雨量是最常用的降雨参数, 但雨量与侵蚀量之间的相关性却并不一定大。王万中等^[16] (1996) 的研究表明, 在黄土高原和东北地区, 雨量与土壤侵蚀的相关性很低, 数量相同的降雨, 在不同的时机产生的侵蚀量极不相同, 但在南方地区, 雨量与土壤侵蚀联系密切。雨强也是一个十分重要的降雨参数, 平均雨强不能反映降雨影响侵蚀的物理机制, 它夸大了低强度降雨时的侵蚀作用, 而又缩小了高强度降雨时段的侵蚀能力。土壤侵蚀可看作是一种做功过程, 能量消耗贯穿于所有侵蚀变化过程中。美国学者 Wischmeier 等 (1958)^[17] 的工作证实了雨滴大小、速度、雨强等的各种组合与溅蚀的作用关系, 证明降雨侵蚀与能量密切相关, 以 8250 个小区降雨资料为基础, 分析了降雨动能、降雨强度、前期降雨量和最后耕作活动等与土壤流失的关系, 发现降雨总动能与最大 30 min 雨强的乘积 EI_{30} 与土壤流失量关系最好^[18], 并在 1959 年明确提出了降雨侵蚀指数的概念, 即降雨侵蚀力指标 EI_{30} 。降雨侵蚀力指标 EI_{30} 反映了雨滴溅蚀以及地表径流对土壤侵蚀的综合效应, 在模型 USLE 和 RUSLE 中得到直接应用^[4]。

以后许多学者又提出了其它形式的降雨侵蚀力指标。Foster 等 (1982)^[19] 研究显示指标 EI_{30} 与 PI_{30} (P 指次降雨量) 之间高度线性相关, 可以采用指标 PI_{30} 来计算次降雨侵蚀力, 从而避免繁琐复杂的降雨动能计算。

我国有关降雨侵蚀力指标研究从 20 世纪 80 年代初开始, 不少科研工作者通过各地小区资料的统计分析, 以 EI 结构形式为基础, 提出了各地区的 R 值指标。这些指标主要有:

东北黑土地区:

$$R = E_{60} \cdot I_{30} \quad (\text{张宪奎, 1991})^{[20]} \quad (12)$$

式中: E_{60} 为一次降雨 60 min 最大降雨量产生的动能, J/m^2 ; I_{30} 为一次降雨 30 min 最大降雨强度, cm/h 。

西北黄土地区:

$$R = E_{60} \cdot I_{10} \text{ 或 } R = \sum E \cdot I_{10} \quad (\text{王万中, 1991})^{[21]} \quad (13)$$

$$R = \sum E \cdot I_{10} \quad (\text{贾志军, 1986})^{[22]} \quad (14)$$

$$R = P \cdot I_{30} \quad (\text{江忠善, 1990})^{[23]} \quad (15)$$

式中: P 为一次降雨的雨量, mm, 其余符号同上。

南方红壤地区:

$$R = 2.455 E_{60} \cdot I_{60} \text{ 或}$$

$$R = \sum E \cdot I_{60} \quad (\text{吴素业, 1992})^{[24]} \quad (16)$$

$$R = \sum E \cdot I_{60} \quad (\text{黄炎和, 1992})^{[6]} \quad (17)$$

式中: $\sum E$ 为一次降雨的总动能; E_{60} 为一次降雨 60 min 最大降雨量产生的动能 (J/m^2); I_{60} 为一次降雨 30 min 最大降雨强度, cm/h 。

王万中等^[16] 在总结以上成果的基础上, 在全国选择了比较有代表性的 10 个小区资料, 通过对降雨单因子与土壤流失量关系的统计分析, 从相关性及拟合程度中选择了个普遍适用的指标 $\sum E \cdot I_{30}$ 作为降雨侵蚀力指标, 认为我国降雨侵蚀力指标采用 EI_{30} 相对最好, 在动能不可得时可以采用雨量和 30 min 最大雨强的乘积 PI_{30} 来计算侵蚀力。

2.2 降雨侵蚀力计算方法

(1) 次降雨侵蚀力计算。降雨侵蚀是坡面侵蚀的动力, 包括雨滴溅蚀和径流冲蚀, 做功的能量是由降落雨滴和坡面径流供给的。当雨滴撞击到土壤表面时, 它突然停止, 这个突然的减速引起了水与土交界面的压力, 该压力类似于管路中阀门迅速关闭所见到的压力 (水锤压)。国外有学者在 1977 年通过试验发现^[9], 当 5.6 mm 的水滴以 8 m/s 的速度与土壤表面相碰时, 最大正应力约为 6MPa, 水滴内部的高压迫使其以辐向流的形式侧向溢出。由于水土交界面高压和水流侧向剪切力的影响, 土壤遭到破坏。单个雨滴动能可以通过 (11) 式计算得出, 由 (11) 式, 可以用方格法、滤纸色斑法、面粉球法、快速摄影法和雷达观测法等测量出雨滴直径并数出雨滴数量, 就可以推求一次降雨在单位面积上单位降雨深所具有的能量。计算步骤为:

(1) 用上面方法求出各个雨滴直径 d ;

(2) 由 d 用牛顿公式及修正的沙玉清公式求出相应的雨滴速度 v ;

(3) 用 Excel 求出每个雨滴所具有的动能 e_i , 其中 i 代表雨滴编号;

(4) 将各个雨滴质量累加起来, 得到取样面积上全部雨滴的总动能 $\sum e_i$;

(5) 将取样的各个雨滴质量累加起来, 除以水的密度和滤纸面积, 得降雨深;

(6) 雨滴总动能除以降雨深和取样面积, 即得到该次降雨在单位面积上单位降雨深所具有的能量。

则对于整场降雨的侵蚀能量 (E) 为:

$$E = \frac{1}{12} \sum \pi d_i^3 \rho v_i^2 \tag{18}$$

将(18)式代入以上降雨侵蚀力计算计算公式,就得到次降雨侵蚀力。

(2)年降雨侵蚀力计算。年降雨侵蚀力等于年内所有侵蚀性降雨的侵蚀力之和,计算多年平均降雨侵蚀力一般要求至少 20 年以上的资料。用以上方法计算年降雨侵蚀力需要连续记录的降雨过程资料,但在很多国家和地区很难获得该类型资料,因此一般建立降雨侵蚀力简易算法,即利用气象站常规降雨统计资料估算侵蚀力。简易算法的简易表现在两个方面,一是获得资料更为容易,二是资料的整理及计算相对简单。月或年雨量是最易获得的雨量资料,利用它们来估算侵蚀力是最常见的一类降雨侵蚀力简易算法,许多学者进行了这方面的研究,目前我国建立的区域性侵蚀力简易算法也多采用月或年降雨量资料。王万中等^[25]还曾采用汛期雨量、年最大 30 min 雨强、年 60 min 最大雨量等特征参数估算年降雨侵蚀力。月或年降雨资料是相对比较粗略的雨量资料,用来估算降雨侵蚀力的精度自然也会受到一定限制。USLE 模型中曾采用 2 年一遇 6 h 降雨量来估算美国西部 11 州的降雨侵蚀力,张宪奎等^[20]采用类似资料估算了中国黑龙江省的降雨侵蚀力。在修订的通用土壤流失方程 RUSLE 中,美国西部各州的降雨侵蚀力改用每小时雨量估算。不同类型雨量资料提供的降雨特征信息不同,用来估算降雨侵蚀力的精度也会有所差别,需要进一步对不同类型降雨资料估算降雨侵蚀力的差异进行对比分析。我国常规气象台站覆盖全国,基本气象台站就有 600 余个,并定期发布逐日降雨资料,还整编了部分年份的日 10 min 和 60 min 最大雨强资料^[4]。

上述降雨侵蚀力的计算都没有考虑到局部地形、融雪、冻土等因素对土壤侵蚀的作用。尽管研究降雨侵蚀力时一般假定侵蚀力与坡度无关,但实际上雨滴溅蚀仍与坡度有关,缓坡溅蚀很小,在平缓的地表,会产生地表积水,对雨滴的打击起到缓冲作用。RUSLE 模型中利用 10 年一遇暴雨的侵蚀力 EI_{30} 值代表比较典型的暴雨强度和地表状况,结合径流指数来修正坡度对降雨侵蚀力的作用。融雪、冻土等因素影响土壤侵蚀的过程与雨滴击溅土壤颗粒、径流冲刷等引起土壤流失的过程明显不同^[4]。

3 降雨与产流、产沙的关系

3.1 次降雨条件下的产流计算

流域产流取决于流域下垫面情况及降雨条件。

在土壤侵蚀严重地区大多为超渗产流,因此可以认为降雨量、雨强、降雨过程是决定流域产流的主要因子。田永宏等^[26]统计黄土高原 21 条小流域 598 次暴雨洪水资料,经相关、拟合、回归分析,建立小流域次降雨条件下的产流计算式:

$$M = B_0 I^{B_1} P^{B_2} \tag{19}$$

式中: M 为一次降雨流域产流模数, m^3/km^2 ; P 为一次降雨的雨量, mm ; I 为一次降雨的权重降雨强度, mm/h ; B_0, B_1, B_2 为与下垫面条件有关的小流域产流系数(常数); $I = \sum P_i I_i / P$, 其中 P_i 为一次降雨各时段的降雨量(mm); I_i 为一次降雨各时段雨强, mm/h 。

3.2 次降雨条件下的产沙计算

流域产沙是流域内气象因子和下垫面条件相互作用的结果。对某一特定的流域而言,其下垫面条件在某一时段内可以认为是不变的,于是影响流域产沙主要为降雨径流因子。文献[24] 分别利用水沙关系和一次暴雨推求出产沙模数方程。

利用水沙关系:

$$M_s = a M^n \tag{20}$$

式中: M_s 为一次洪水流域产沙模数, t/km^2 ; M 为一次洪水径流模数, t/km^2 ; 其中 $a = k_1 A^{k_1}$, $n = k_2 A^{k_2}$, A 为流域面积, km^2 ; k_1, k_1', k_2, k_2' 为与流域特征有关的产沙系数。

利用一次暴雨:

$$M_s = C_0 I^{C_1} P^{C_2} \tag{21}$$

式中: I, P 同上; M_s 为一次暴雨条件下流域产沙模数, t/km^2 ; C_0, C_1, C_2 为与流域下垫面条件有关的产沙系数。

4 主要研究方法介绍

对于降雨及降雨侵蚀力的研究,国内外通常采用的研究方法有两种,即人工模拟降雨法和土壤整体试验法。

(1)人工模拟降雨。利用降雨模拟装置,对降雨进行有效的控制,模拟不同类型的各种强度的降雨,可以在短期内,在人为控制条件下从多方面来研究降雨的各种特性及其侵蚀力的大小(如降雨总量、强度、雨滴大小、雨滴落速、降雨动能)及各种边界条件(如坡度、坡长、植被、土壤类型等)对土壤侵蚀的影响。

(2)土壤整体试验法。为了在试验室内获得和野外等效的降雨侵蚀状况,人们常采用土壤整体试

验法进行试验研究。在尽量保持土壤剖面完整性的前提下,在室内用土壤整体做人工降雨试验。使用此方法,可在严格控制的条件下,测定侵蚀作用与影响因素之间的定量关系,降雨历时、雨强和雨滴大小都可以进行变动。

5 结 语

降雨是导致水土流失的动力因子,降雨能量对水土流失影响直接反映为降雨侵蚀力,即由降雨引起水土流失的潜在能力。准确评估计算降雨侵蚀力对人工降雨研究及定量预报土壤流失具有重要意义,本文由影响降雨侵蚀力的雨滴直径、雨滴落速、降雨动能等研究方法及其研究进展进行总结与探讨,并对降雨侵蚀力的表述与计算进行讨论,得出:

(1)降雨侵蚀存在很大地域性差异,受自然因素影响也较大,针对这一特点,本文将各研究方法进行列举与总结,在今后降雨侵蚀力研究中,根据试验特点可以对文中研究方法进行优选使用。

(2)要计算降雨侵蚀力,首先必须确定反映次降雨侵蚀能力(R)大小的降雨侵蚀力指标,并以此为基础计算出降雨侵蚀力。本文将前人提出的各指标进行对比,得出我国降雨侵蚀力指标采用 EI_{30} 相对最好,故本文推荐采用王万中提出的 $\sum E \cdot I_{30}$ 作为降雨侵蚀力指标,在今后的研究中,可以直接采用。

(3)由于天然降雨的雨滴特征受到地理位置和雨型等因素的影响,在各地建立的降雨能量计算公式的结构形式或系数也不尽相同,我国目前还缺乏通用性好、适用于全国的降雨能量计算公式,本文推荐采用取样与统计相结合的方法,用式(18)进行计算。

参考文献:

- [1] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持, 1997, 15(4): 15-17.
- [2] 付 炜. 土壤侵蚀成因机制分析与模拟[J]. 干旱区研究, 1997, 14(4): 44-50.
- [3] 夏艳华, 张平仓. 基于侵蚀力学机制的流域土壤侵蚀模型研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 152-154.
- [4] 章文波, 谢 云, 刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 43-46.
- [5] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983, 1(3): 32-36.
- [6] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1-5.
- [7] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18.
- [8] 谢 云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [9] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀-产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 29-56.
- [10] 牟金泽. 雨滴速度计算公式[J]. 中国水土保持, 1983(3): 40-41.
- [11] Hall M J. Use of the stain method in determining of the drop-size distributions of coarse liquid sprays[J]. Transactions of the ASAE, 1970, 13(1): 33-41.
- [12] 舒若杰, 高建恩, 吴普特, 等. 基于计算机绘图软件的雨滴谱测定新方法[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 65-69.
- [13] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [14] 雷阿林, 张学栋, 唐克丽. 几种计算水滴降落速度方法的比较[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 43-47.
- [15] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1997: 35.
- [16] 王万中, 焦菊英, 郝小品. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 II [J]. 水土保持学报, 1996, 10(1): 29-39.
- [17] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relation ship to soil loss[J]. Trans American Geophysical Union 1958, 39(2): 285-291.
- [18] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (I) [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5-18.
- [19] Foster G R. Evaluation of Rainfall-Runoff Erosivity factors for individual storms[J]. Transactions of ASAE, 1982, 25(1): 124.
- [20] 张宪奎. 黑龙江省土壤流失预报方程中 R 指标的研究 [C] // 水土保持科学理论与实践. 北京: 林业出版社, 1992, 63-66.
- [21] 王万中. 黄土地区降雨侵蚀力 R 指标的研究[J]. 中国水土保持, 1987(12): 34-38.
- [22] 贾志军, 王小平, 李俊义. 晋西黄土丘陵沟壑区降雨侵蚀力指标 R 值的确定[J]. 中国水土保持, 1987, 5(6): 18-20.
- [23] 江忠善, 贾志伟, 等. 降雨特征与水土流失关系的研究[J]. 西北水土保持所集刊, 1990(12): 9-15.
- [24] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力指标的研究[J]. 中国水土保持, 1992, 10(2): 32-33.
- [25] 王万中, 焦菊英, 郝小品. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 II [J]. 水土保持学报, 1996, 2(1): 29-39.
- [26] 田永宏, 郭玉梅, 张庆伟, 等. 黄丘一区一次降雨条件下的产流产沙计算[J]. 中国水土保持, 1997, 15(2): 14-18.