

人工模拟降雨特性的试验研究

陈文亮 王占礼

(中国科学院
水利部 西北水土保持研究所·陕西杨陵)

提 要

本文对降雨的特性,降雨量、降雨强度;降雨分布的均匀性;雨滴直径大小和分配;雨滴终点速度等方面进行了试验研究,并根据国内外学者的研究成果与笔者的工作,提出了一些有代表性的测定方法和计算方法。

关键词:人工模拟降雨 雨滴直径 雨滴终点速度

The Trial Research on the Behaviours of Artificial Rainfall by Simulation

Chen Wenliang Wang Zhanli

(The Northwestern Institute of Soil and Water Conservation,
Academia Sinica and the Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi Province)

Abstract

This paper analysed the rainfall behaviours, precipitation, rainfall intensity, homogeneity of rainfall distribution, sizes and distribution of raindrop diameter and terminal velocity of raindrops. Based on the research achievements by the Chinese and foreign scholars and the authors' actual work, the paper suggested some typical methods for the determination and calculation of the aboved variables.

key words: artificial rainfall by simulation raindrop diameter terminal velocity of raindrop

一、概 述

为了加速对土壤侵蚀、水土流失规律和水土保持措施及其效益等方面的科学实验研究,以在最短时间内获取大量系统的数据资料,当今多采用人工模拟降雨方法。人工模拟降雨与天然降雨相比较,不受时空限制,室内室外均可进行,可大大缩短试验研究周期。而且,对于我们所需要的各种降雨参数能有效地加以控制,进行不同因子的试验,在短时间内能获取大量资料。故人工模拟降雨方法普遍为水保等科研部门所重视。

模拟天然降雨,首先要了解天然降雨的特征资料。天然降雨的主要特性包括:(1)降雨量、降雨强度;(2)降雨分布的均匀性;(3)雨滴直径大小和分配;(4)雨滴的终点速度等。目前大多数科学工作者,都是以上述降雨特征值作为人工模拟降雨的比较和评价标准。随着

科学研究的深入发展，根据研究对象的不同，采用了3个层次的模拟降雨方法。1. 降雨量、降雨强度的模拟降雨；2. 降雨强度与雨型的模拟降雨；3. 降雨动能的模拟降雨。所以对人工模拟降雨的各个特征值的分析和测定，具有极重要的意义。

二、降雨量与降雨强度

降雨量与降雨强度，是天然降雨的重要特征之一，也是人工模拟降雨时，首先遇到和考虑的一个重要因素。在人工模拟降雨的许多试验研究项目中，都是以降雨量或降雨强度作为模拟降雨单一指标来考虑，对其它的降雨特性考虑甚少，这是一种最基本的模拟降雨量或模拟降雨强度特性的降雨。所以，在研制或引进人工模拟降雨装置时，首先应把该降雨装置的降雨强度变化的范围，作为重要的指标来考虑，看其能否满足试验工作的需要。

(一) 降雨强度的测定 人工模拟降雨强度与降雨喷头的供水压力有关，可以通过调节供水压力来控制降雨强度的变化。但是喷头的供水压力与降雨强度的关系，受到许多因素的影响，且不同类型的模拟降雨装置其差别很大，在给定的压力下、重复性差，而且即便压力变化范围很大，降雨强度的变幅也不大(图1)，加之理论计算也较复杂，一般采用实测的方法，求出它们的关系曲线。在测定时，先根据不同类型降雨装置的结构特点，确定与降雨强度有关的其它主要因素先固定供水压力，分别测出这些因素与雨强的关系。如对振动式模拟降雨装置与圆盘旋转式的模拟降雨装置，其主要因素，前者是振动频率，后者是圆盘旋转的角速度，在给定的供水压力下，测出振动频率、圆盘旋转角速度与降雨强度的关系曲线然后测出供水压力与降雨强度的关系曲线(图1所示)。对于某些直接喷水的模拟降雨装置，直接给定供水压力，就可分别测出不同压力下的降雨强度。降雨分布均匀的模拟降雨装置，可以安装流量计，根据流量计的流量与降雨面积，计算出降雨强度。测定方法：在事先设计好的率定小区上(图2)，按一定间隔放置雨量筒和1~2台自记雨量计。雨量筒的数量与放置的纵横间距，当散水面积在30m²以内，雨量筒的间距为40~60cm，散水面积大于30m²，雨量筒的间距为80~100cm。测定时，在给定不同的压力(kg/cm²)下，分别测出各测点雨量筒的降水量H_i，接着求出散水面各测点的平均降雨量 \bar{H}_p 。由公式

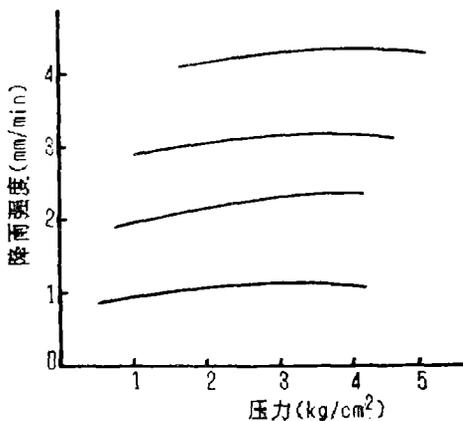


图1 降雨强度与压力的关系

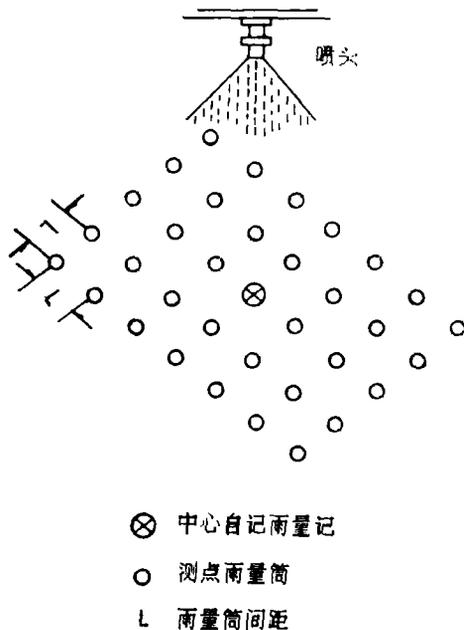


图2 降雨量测定

$$\bar{I} = \frac{\bar{H}_p}{t} \quad (1)$$

得到某一给定压力下，散水面上的平均降雨强度 \bar{I}_p (mm/h)，式中

\bar{H}_p ——散水面上的平均降雨量 (mm)， t ——降雨时间 (h)。

计算出各个给定压力下的降雨强度，以横坐标为供水压力 (kg/cm²)，纵坐标为降雨强度 (mm/h)，绘出供水压力—降雨强度的关系曲线 (以下简称关系曲线) (参看图1)。以后只要调节降雨装置的供水压力，就可根据关系曲线获得所需要的降雨强度。

另外，在测定时，根据各测点的降雨量与散水面上的平均降雨量，引入面点比 R 。

$$R = \frac{\bar{H}_p}{H_i} \quad (2)$$

式中， \bar{H}_p ——散水面上的平均降雨量 (mm)， H_i ——测点雨量 (mm)

由(2)式可知，若已知该模拟降雨装置某一点的降雨量和该点的面点比，就可求出降雨面上的平均降雨量。在试验小区上做试验时，只要事先测出小区中心点的面点比，试验时，在小区的中心点放置一个雨量筒 (计)，测出该中心点的降雨量，就能求出试验小区内的平均降雨量。已知降雨时间，由(1)式就可求出试验小区内的平均降雨强度。

(二) 降雨分布的均匀性

降雨分布的均匀性是降雨的一个重要特征，在土壤侵蚀规律研究试验中有极重要的意义。降雨分布的均匀程度，表示的方法主要有两种。

1. 绘制降雨量等值线图。根据降雨量率定小区上各测点雨量筒的降雨量，或测点的降雨强度，将其等值点连接起来绘制而成。

2. 均匀系数。均匀系数 K

$$K = \left(1 - \frac{D}{H} \right)$$

式中， \bar{H} ——降雨面上的平均降雨量，用算术平均值计算；

$$D = \frac{\sum |H_i - \bar{H}|}{n}$$

H_i ——降雨面上的测点雨量； n ——降雨面上的雨量测点总数。

均匀系数 K 值愈高，降雨分布均匀性愈好，根据率定小区 K 值的大小，可确定该降雨装置散水面的范围，以及在散水面选择布设试验小区的最佳面积尺寸。

(三) 雨滴直径大小和分配

雨滴直径大小和分配是降雨动能的重要参数之一，对于研究降雨侵蚀力具有特殊的意义。在试验观测中，常常遇到降雨总量相同的暴雨，而引起的土壤流失量差别却很大。其原因之一，就是由于两场暴雨的雨滴直径大小和分配不相同。根据试验表明，大粒径的雨滴对土壤表层破坏性很大，在土体溅移，分散过程中起重要的作用。天然降雨的雨滴直径，一般在0.1~6.5mm之间，其中直径小于1.0mm的雨滴占绝大多数。

1. 雨滴直径的测定。雨滴直径的测定方法有滤纸测定法、面粉团测定法、照相测定法等多种，最简便和广泛采用的是滤纸测定法，它可以测出各种雨滴直径的大小，能在滤纸上统计计算出单位面积上的雨滴直径大小的分配情况。其方法是在滤纸上涂上一层颜料，当雨滴降落在滤纸上，滤纸吸收水分的地方发生变色，留下永久性的色斑。测量色斑直径大小，用雨滴直径与色斑

直径的关系式换算成雨滴直径；或用率定好的雨滴直径与色斑直径的换算表上（参看表2），查出雨滴的直径。

2. 色斑直径与雨滴直径的换算。根据苏联Г·И·苏尔马启的测定，得到雨滴直径d与滤纸色斑直径D之间的关系式

$$d = \sqrt[3]{\frac{3D^2h}{2}}$$

式中，h——滤纸的厚度，与吸水能力有关。

根据我们实测的资料说明，对于同一型号的滤纸，雨滴直径d与雨滴色斑直径D之间的关系式，是一幂函数式： $d = aD^b$ 根据选用的滤纸和涂料，在室温下，进行实测，由大量的测定数据，经过回归分析，求出常数a、b值，就可获得它们的换算式。

根据国内外研究工作者所获得的雨滴直径与雨滴色斑直径的关系式，列如下表（表1）。

表1 雨滴直径与雨滴色斑直径关系式

关系式	研究单位	涂料
$d = 0.439D^{0.654}$	中国科学院西北水土保持研究所	1:10 甲基兰与滑石粉
$d = 0.322D^{0.743}$	中国科学院西北水土保持研究所	1:10 曙红与滑石粉
$d = 0.45D^{0.667}$	黄委会水利科学研究所	1:10 曙红与滑石粉
$d = 0.343D^{0.76}$	日本	甲基红与四氯化碳
$D = 3.381^{1.5}$	以色列 尼曼	甲基兰与四氯化碳

注：d——雨滴直径（mm）； D——雨滴色斑直径（mm）。

表2 d与D分级换算表

雨滴色斑直径 D (mm)	雨滴直径 d (mm)	雨滴色斑直径 D (mm)	雨滴直径 d (mm)
1~3	0.5	1~2	0.5
4~6	1.0	3~5	1.0
7~10	1.5	6~8	1.5
11~14	2.0	9~12	2.0
15~18	2.5	13~16	2.5
19~23	3.0	17~21	3.0
24~27	3.5	22~26	3.5
28~32	4.0	27~32	4.0
33~37	4.5	33~38	4.5
38~43	5.0	39~45	5.0
44~48	5.5	46~51	5.5
49~54	6.0	52~58	6.0
55以上	6.5	59以上	6.5
1:10 曙红+滑石粉涂料 $d = 0.322D^{0.743}$		1:10 甲基兰+滑石粉涂料 $d = 0.439D^{0.654}$	

为方便测定雨滴的直径，事先应用它们的关系式，计算出不同雨滴色斑直径相对应的雨滴直径，填入雨滴直径和雨滴色斑直径的换算表上，如表1所示，以备测定查用。

3. 雨滴直径分配的测定计算方法。首先是在接受雨滴的滤纸上，量测出所有雨滴的色斑直径，并分类合并，根据雨滴直径和雨滴色斑直径关系式或查表，换算成雨滴直径。然后统计出各类直径的雨滴数量，以及各类直径的雨滴所占的重量或体积的百分比，还可根据需要进行计算出雨滴的中数直径。进一步根据滤纸的面积，就可计算出单位面积（1 m²）上的雨滴组成情况，即每1 m²的面积上雨滴的数量以及各类直径雨滴所占的重量或体积的百分比。

以上计算统计工作，从取样开始到在滤纸上将各类色斑直径分别量测出来，换算成雨滴直径，特别是小直径的雨滴数量多，工作量大、繁杂，若取样、量测有误差，就会影响计算

精度。常常也采用贝斯特 (A · B · Best) 的天然降雨分配经验关系式来计算，

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{d_k}{a}\right)^n}$$

式中，F——雨滴直径小于或等于 d_k 的雨滴体积累积百分数 (%)；

d_k ——雨滴直径 (mm)； n——雨型常数 $n \approx 2.25$ ；

a——与降雨强度相关的常数， $a = 1.30I^{0.232}$ ， I——降雨强度 (mm/h)。

由贝斯特 (A · B · Best) 降雨分配关系式，可以推出雨滴中数直径 (d_{50})，当使雨滴重量或体积百分数累积到50%，即 $F = 50\%$ 时，关系式变为

$$d_{50} = 0.69 \frac{1}{n} AIP$$

式中，n——雨型常数 $n \approx 2.25$ ； A——常数 $A = 1.30$ ； P——常数 $P = 0.232$ ；

I——降雨强度 (mm/h)。

(四) 雨滴降落终点速度

雨滴降落终点速度又叫雨滴末速度或雨滴的打击速度，是降雨动能的重要参数之一。生成的雨滴靠自身的重量，在空气中以自由落体状态向下运动，下落的过程中，由于空气的阻力，使雨滴受到向上的托力，雨滴的运动状态渐渐地被改变，当雨滴下落到某一高度，雨滴的重力与空气的阻力达到平衡时，雨滴则以某一不变的速度匀速下落到地面，此时的雨滴降落速度，称之为雨滴降落的终点速度。

1. 雨滴终点速度与雨滴大小的关系。大小不同的雨滴的终点速度是随雨滴直径的增大而增大。天然降雨的雨滴直径一般在0.1~6.5mm，再大的雨滴是难于存在的。过大的雨滴在空气中，因受阻力会变成扁平形，增大与空气的接触面，导致雨滴未达到相应的终点速度之前就已破裂。根据Blamchard的观察，直径在5.4mm以上的雨滴，在空中降落时不稳定，在未达到终点速度以前已崩解为小雨滴。劳斯(J · O · Lows)、冈恩(R · Gunn)和金泽尔(G · D · Kinzer)、牟金泽等，对大小不同的雨滴的终点速度做了大量的实验研究工作，获得了一系列雨滴的终点速度资料 (表 3)。

表3 雨滴直径与降落终点速度

雨滴直径 d (mm)		0.1	0.25	0.50	0.75	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
终点速度 V (m/s)	J · O · 劳斯	—	—	—	—	4.85	5.51	6.58	8.06	8.86	9.25	9.30
	F · N · 什维布斯	0.27	0.90	2.10	3.00	—	—	—	—	—	—	—
	物体沉降速度公式	0.24	0.88	1.95	2.69	4.79	5.26	6.90	8.06	8.62	9.11	9.30

2. 雨滴终点速度与降落高度的关系。不同大小的雨滴因降落高度而获得各自相应的终点速度。据劳斯 (J · O · Lows) 的研究资料，认为要使所有不同大小的雨滴能达到其相应的终点速度，其最小降落高度需要20m，如果只要使95%的雨滴达到其相应的终点速度，最小的降落高度可减少到7~8m左右。哥德曼提出，当雨滴的降落高度在4.3m以上时，就能使大雨滴达到终点速度的80%。表4是冈恩 (F · Gann)，F · N · 什维布斯等的实测资料，不同直径的雨滴达到终点速度所需要的最小降落高度。

表4 不同直径雨滴达到终点速度所需要的降落高度

雨滴直径d (mm)	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
雨滴终点速度V(m/s)	0.27	0.90	2.10	3.00	4.03	4.46	8.06	8.83	9.09	9.18
需要的最小高度h(m)	0.05	0.30	0.70	1.60	2.20	5.00	7.20	7.80	8.20	8.60
备 注	F·N·什维布斯					R·冈恩等				

3. 风力对雨滴终点速度的影响。在进行人工模拟降雨,特别是在野外模拟降雨试验时,会明显地遇到风力影响。实测表明,风力影响下的雨滴终点速度比无风时的终点速度要大。据夏乔里(A·shachori)和塞古纳尔(I·Seginer)的实测资料,20km/h的风速下,3.0mm直径的雨滴终点速度为9.8m/s,即比无风时的雨滴终点速度8.1m/s增加了20%。

4. 雨滴终点速度的测定。雨滴终点速度的测定,目测法,似太简单,误差较大;静电场闪光照相方法又太复杂。因此,许多研究工作者,提出了雨滴终点速度的计算式。雨滴终点速度的计算,目前还没有一个统一的计算公式,其计算结果也无统一的验证标准,通常采用劳斯(J·O·Lows)、冈恩(R·Gunn)和金泽尔(G·D·Kinzer)等的资料,作为参考标准来加以比较(参看表2)。下面介绍几种雨滴降落速度的计算方法。

(1) 采用物体降落运动方程式,计算雨滴的降落速度。雨滴在空气中下落过程,如果不考虑风等因素的影响,主要受到雨滴自身重量($m_k g$)向下的力与雨滴下落运动受到向上的空气阻力Q的作用。雨滴下落运动时,其运动方程

$$m_k g - Q = m_k \frac{dv_k}{dt} \quad (4)$$

式中右边 $m_k \frac{dv_k}{dt}$ 为运动变量,取 $Q = \alpha v_k^2$ 代入(4)式,得

$$\frac{dv_k}{dt} + \frac{\alpha}{m_k} v_k^2 = g$$

经变换得伯努利方程

$$\frac{dv_k}{dh} v_k + \frac{\alpha}{m_k} v_k^2 = g \quad (5)$$

解方程(5)式得

$$v_k^2 = e^{-\frac{2\alpha}{m_k} \cdot h} \cdot \left(c + \frac{g m_k}{\alpha} e^{-\frac{2\alpha}{m_k} \cdot h} \right) \quad (6)$$

当 $h = 0$ 时,则 $V_0 = 0$, 求出 $C = \frac{g m_k}{\alpha}$ 。将C值代入(6)式得

$$V_k^2 = \frac{g m_k}{\alpha} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2\alpha}{m_k} \cdot h} \right) \quad (7)$$

当 $h \approx \alpha$ 时,雨滴为稳定的匀速运动,则 $\alpha = \frac{g m_k}{V_k^2}$, 式中 V_k 为雨滴的稳定降落速度,即终点速度。

将 α 代入(7)式,则得到任意高度的雨滴降落速度

$$V_k = \sqrt{V_k'^2 \cdot (1 - e^{-\frac{2g \cdot h}{V_k'^2}})} \quad (8)$$

式中, V_k ——任意高度的雨滴降落速度 (cm/s); V_k' ——雨滴的终点速度 (cm/s);
 h ——雨滴的降落高度 (cm); g ——重力加速度 $g = 981$ (cm/s)。

在模拟降雨时, 运用该公式计算某一高度的雨滴降落速度, 式中的雨滴终点速度 V_k' , 可参照劳斯 (*J. O. Lows*) 等人的雨滴终点速度资料, 或选用其它方法计算所得的结果, 代入(8)式, 就可以求出任意高度的模拟降雨的雨滴降落速度。应用该式时, 计算的结果要根据情况作些修正。

(2) 根据雨滴特性及降落时受力的情况, 建立关系式来计算雨滴终点速度。根据雨滴终点速度的定义, 雨滴降落运动过程中, 受雨滴自身的重量 W , 方向朝下, 与空气的阻力 F , 方向向上, 两个力同时作用。当雨滴降落到某一高度作速度不变的运动时, 即雨滴达到终点速度, 这时雨滴所受到的重力与空气阻力相等, 即 $W = F$ 。

$$\text{已知} \quad W = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 W \quad (9)$$

$$F = \frac{C_D P \pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 V_t^2}{2} \quad (10)$$

当雨滴达到终点速度时, $F = W$, 将(9)和(10)式代入等式, 经整理后得

$$V_t = \sqrt{\frac{4 W d^3}{3 C_D d_1^2 \rho}} \quad (11)$$

式中, V_t ——雨滴终点速度 (m/s); W ——水的重率 (kg/m^3);
 d_1 ——雨滴在最终形状的直径 ($d_1 = 1 - 1.26d$); d ——雨滴直径 (m)
 ρ ——空气的密度 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$);
 C_D ——阻力系数, 雨滴为球形时 $d = d_1$, $C_D = 0.34$, 雨滴为半球形时 $d_1 = 1.2d$,
 $C_D = 0.38$, $d = 4.5\text{mm}$ 以上时, $C_D = 0.40$ 。

先测出雨滴直途, 然后根据(11)式就可计算出雨滴终点速度。

(3) 牟金泽、周佩华等人研究提出运用类似物体在静止流体中的沉降速度规律, 计算雨滴在空气中的降落终点速度。对于 $d > 1.5\text{mm}$ 范围内的雨滴, 对沉降公式要作一些修正。计算时, 取温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 时的水重率 $r = 0.998\text{g}/\text{cm}^3$, 空气重率 $r_a = 0.00129\text{g}/\text{cm}^3$, 空气的动系数 $\mu = 0.153\text{cm}^2/\text{s}$, 重力加速度 $g = 980\text{cm}/\text{s}^2$, 将其代入沉降公式来计算, 并考虑雨滴的变形情况, 引入变形速度系数 k 。经过修正的沉降公式如下:

a. 滞流区, 当 $d < 0.05\text{mm}$ 运用司笃克斯公式

$$V = 2985d^2 \text{m/s}$$

b. 介流区, 当 $d = 0.05 \sim 1.9\text{mm}$ 运用修正的沙玉清公式

$$V = 0.496K \text{antilg} [\sqrt{28.320 + 6.524 \lg d - (\lg d)^2} - 3.665] \text{ (m/s)}$$

式中, 当 $d < 1.5 \text{ mm}$ 时 $K = 1.0$

当 $d \geq 1.5 \text{ mm}$ 时 $K = 1.00 \sim 0.53$

C. 紊流区, 当 $d = 1.9 \sim 6.5 \text{ mm}$ 运用修正的牛顿公式

$$V = 15.93K\sqrt{d} = (17.20 - 8.44d)\sqrt{d} \text{ (m/s)}$$

式中, d ——雨流直径 (mm)。

雨滴降落速度是研究降雨动能的重要参数之一, 不同的雨滴终点速度决定了雨滴对地表土体的打击程度。雨滴降落速度, 特别是雨滴终点速度是人工模拟天然降雨的重要指标之一, 也是研制人工模拟降雨装置的重要依据, 确定降雨装置的高度以及喷头的初始速度等的依据, 所以对模拟降雨雨滴降落速度的测定和计算有十分重要的意义。

三、结束语

目前, 由于对天然降雨特性尚需进行深入研究, 积累资料。同时在人工模拟降雨与天然降雨相比较指标方面, 还没有统一确立一种更合适的参数, 所以降雨量, 降雨强度, 降雨分布的均匀性, 雨滴直径大小和分配, 雨滴终点速度等降雨特征, 在当前就显得特别的重要。为了使其测定和计算所提出的成果偏于安全, 其中对雨滴终点速度和降雨动能的测定结果, 通常使用罗斯 (*J. O. Lows*) 等人的资料来作对照。文中提出的测定和计算方法, 仅供参考。文中提到的降雨动能, 以后作专题讨论。

参 考 文 献

1. 窦葆璋等. 雨滴观测方法计算方法. 《水土保持通报》, 1982年, 第1期
2. J. O. Lows. 《Measurement of Fall Velocity of Water Drops and Rain drops f vans》
AGU22, PP. 709~720. 1941
3. R. Gvnn and G. D Kinger. 《The Terminal Velocity of Fall for Water DroPletss》
Jour of Metevor. 6: PP243~248. 1949
4. 牟金泽. 《雨滴速度的计算公式》. 《中国水土保持》, 1983年, 第3期
5. 渡边武夫等. 《坡面侵蚀试验用的人工降雨装置》. 新砂防, 22 (4)