

SR 型野外人工模拟降雨装置*

陈文亮, 唐克丽

(中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)

摘要: SR 型人工降雨装置是一种多喷头、多单元组合式的间歇降雨装置。选用目前国内外较理想的喷头, 在喷头处辅以可改变喷头降水方式的机械传动装置, 以间歇方式降雨来满足其降雨强度, 雨滴直径大小及其分布与自然降雨相似。每个单元的有效降雨面积为 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$; 如果 4 个单元组合成, 其长度可增加 4 倍, 有效降雨面积即 $2\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。装置采用轻型铝合金材料制成, 结构简单, 易于安装拆卸, 适用于野外工作。

关键词: 模拟降雨; 喷头; 间歇式降雨; 降雨特性; 相似

中图分类号: P48 TH763

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2000)04-0106-05

A New SR Style Field Artificial Rainfall Simulator

CHEN Wen-liang, TANG Ke-li

(Institute of Soil and Water Conservation, CAS/MWR National Key Lab of
Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling Shaanxi 712100, PRC)

Abstract: The new SR style artificial rainfall simulator was an intermittent rain device composed by multiple nozzles and units. The nozzles were more ideally selected from home and abroad, which supplemented the mechanical transmission equipment to change the nozzles and the rainfall intensity could be changed and satisfied by the intermittent rainfall pattern. The raindrop diameter and distribution was similar with the natural rainfall. The effective rainfall area was $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ for every rainfall unit, if 4 rainfall units were composed, the length could be increased 4 times, and the effective rainfall area was $2\text{ m} \times 20\text{ m}$. The equipment was constructed by aluminum alloy material, and the simple structure could be easy to install and dismantle, and suitable to work in field.

Key words: rainfall simulator; nozzles; intermittent rainfall; similarity

为了提供水土保持规范的科学依据, 以及定量的评价土壤侵蚀, 以往这方面的工作, 用设立野外径流小区, 进行定位观测, 这是一种耗时费力的方法, 难以取得规律性的有效数据。如果使用野外人工模拟降雨装置, 就可克服上述缺点, 缩短试验周期, 加速土壤侵蚀规律研究的过程。研制一套理想的人工模拟降雨装置已成为解决以上问题的主攻目标。

我们参考前人的有关工作基础和资料, 研制了一套 SR 型野外人工模拟降雨装置。SR 型降雨装置是一种多喷头、多单元组合式的间歇降雨装置; 喷头出水孔径较大, 其雨滴直径大小分布与天然降雨相似。喷头处辅以使喷头往返摆动的机械装置, 可增加

喷头的散水面积和均匀度, 可将降雨强度控制在实用的雨强范围内, 是一种较理想的人工模拟降雨装置。

1 降雨装置的构成与设计

降雨装置由下列部分组成: (见图 1)。

(1) 降雨喷头: 能提供所要求的雨滴粒径大小, 降雨强度, 降雨分布的均匀性等特性的降雨。

(2) 降雨座架: 提供一定高度的满足雨滴下落能量达到雨滴终点速度, 以及提供安装喷头驱动装置等。

* 收稿日期: 2000-10-08

本文获国家重点实验室新设备研制基金资助和中科院重点项目资助(批准号 Z102)。

- (3) 驱动机构。使喷头往返摆动, 改善降雨雨滴的分布, 以及扩大喷头的散水面积。
- (4) 动力系统。供给降雨装置所需要的动力。
- (5) 供水系统。供给降雨装置所需要的用水。

1.1 降雨喷头

喷头是降雨装置的核心部分, 选用了由美国喷灌公司生产的 V-80100 型喷头, 该喷头呈扁平型, 出水孔径 6.4 mm, 其设计喷水量, 见表 1。

表 1 V—80100 型喷头喷水量

压力/(kg·cm ⁻²)	0.5	1	2	3	4	5
流量/(L·min ⁻¹)	18	23	32	39	45	50

每个单元的降雨装置由 2 个喷头组成。

1.2 降雨座架

降雨座架为框架式结构, 为了方便安装, 拆卸和运输, 采用组合式设计, 使用轻型铝合金材料。每个单元约重 50 kg, 桁架 1 m × 5 m, 高 2.2 m, 支架间距离分别为 3 m 和 2.2 m。支架与梁架连接处, 装有变角度接板, 在坡地上工作时, 改变支架与梁架的连接角度, 使之适用 0~25° 的坡地上工作。座架由支架、变角度接板、梁架等部分组成。

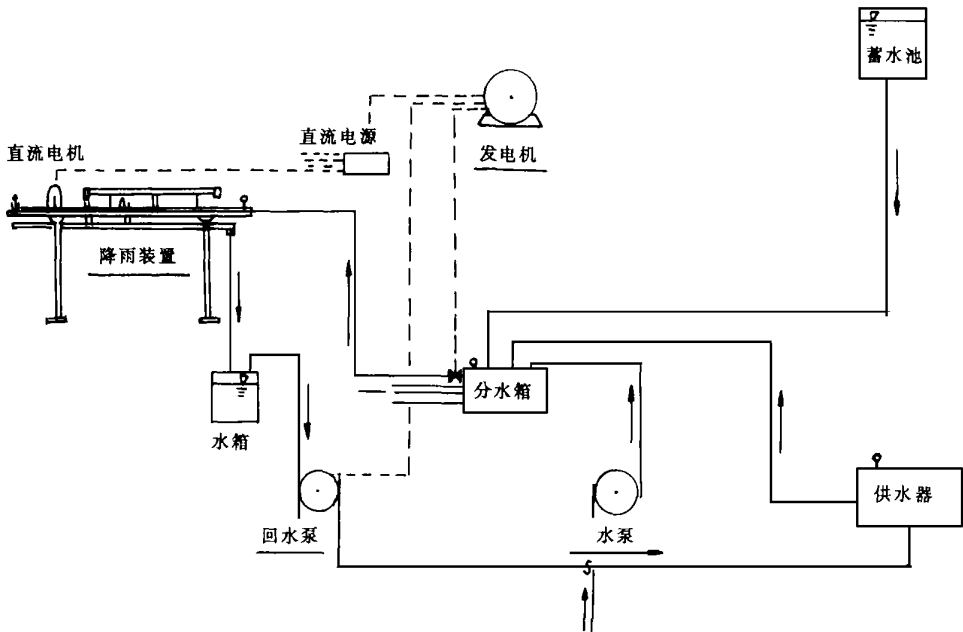


图 1 人工模拟降雨装置工作图

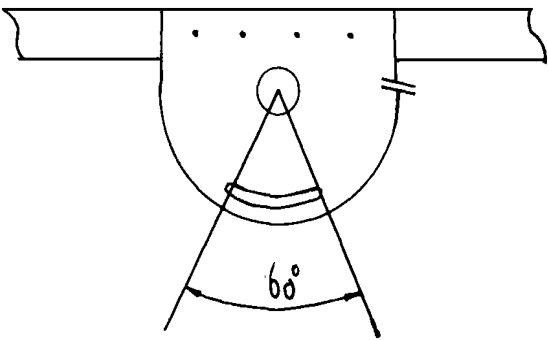


图 2 变角度接板

- (1) 支架, 采用 50 mm 的铝圆管, 50 mm × 50 mm 方管等铝型材料, 底座装有减压板, 避免支架工作时陷入松软的泥土中, 支架长 2.1 m。
- (2) 变角度接板。用 $\delta=6\text{ mm}$ 的铝合金板, 接板将支架与梁架联接, 通过接板上的旋转机构, 来改变

支架与梁架之间的角度, 使座架适应在不同坡度上工作。接板上还装有接环, 以加强架在坡度上工作的稳定性。图 2 所示。

(3) 梁架。使用 60 mm × 60 mm、50 mm × 50 mm 的角铝, $\delta=6\text{ mm}$ 的铝板等铝型材料铆接而成。梁架长 5 m, 宽 1 m。喷头, 驱动机构, 供水, 排水管件等安装在此梁架上, 见图 3。

1.3 驱动机构

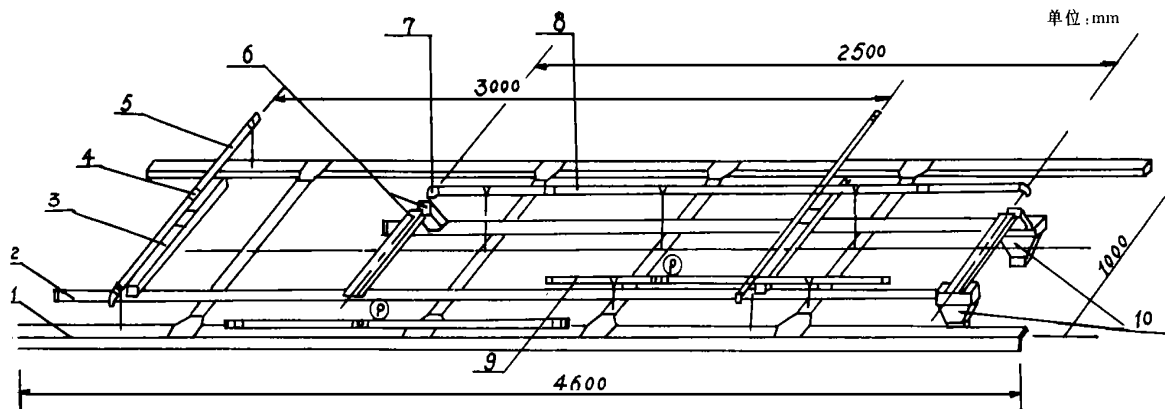
驱动机构包括电动马达、马达箱、传动连杆、行走轨道等部分, 见图 4 传动系统。

(1) 马达, 先用 0~12 V, 30 W 或 0~24 V, 40 W 的直流电机, 电机有 2 个档速, 最大转速 60 转/min。

(2) 传动连杆, 由转动轴柄、摆杆、行走轮、行走轨道、喷头摆柄等构件组成。转动轴柄转动半径 10 cm, 与摆杆连接, 摆杆摆动角 81°。摆杆的另一端与行走拉

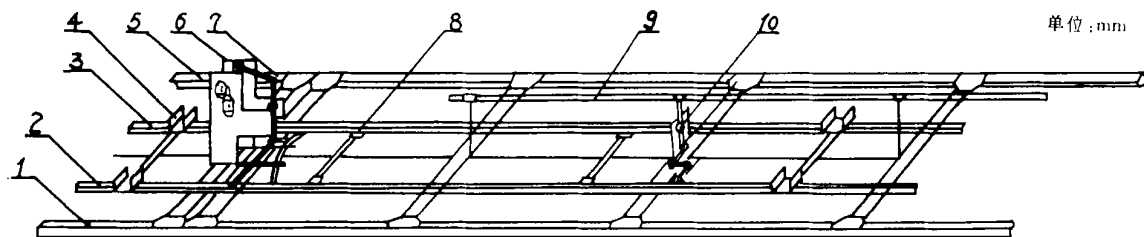
杆连接,行走拉杆往返移动距离 14 cm,行走拉杆另

一端与喷头摆动柄相连,喷头的摆动角为 81° 。



1. 座架 2. 回水管 3. 水槽 4. 喷头(1) 5. 水管
6. 拦水槽 7. 喷头(2) 8. 摆动水管 9. 供水管 10. 回水漏斗

图3 管道回路布设



1. 座架 2. 3. 拉杆 4. 水槽座架 5. 传动马达 6. 马达座架
7. 传动连杆 8. 行走轮架 9. 摆动杆 10. 换向传动连杆

图4 传动系统

1.4 动力系统

主要包括发电机组,直流稳压电源以及线路设备。

(1)发电机组。为单相交流同步发电机组,发电机型号 ST—3 单相交流同步电机,容量 3 kW,电压 230 V/130 V,电流 13 A/26 A。

(2)直流稳压电源。该电流是根据降雨装置多单元组合工作的需要,为四路供给电源,可供给一个单元工作,也可同时供给四个单元组合工作而设计的。

仪器为可控硅整流稳压电源,回路独立输出,每路(组)电源均可用电流表、电压表指示。各路共用一个电压表,电流表通过互锁开关人工手动选择,分别显示。每路电源输出,电压均为 0~50 V,连续可调(不分档)输出电流最大为 3 A。

1.5 供水系统

为了适应野外工作,根据水源的情况,采用多种供水方式。主要的方式有远离水源的地方,用消防供水车运水供给;靠近沟河、池塘等有水源的地方,采

用水泵直接供给;在地形高差大而供水车难以到达,试验区又相对固定的地方,可修建蓄水池供水。供水系统包括消防供水车、水泵、输水管道、分水箱、供水管、压力表等。

1.5.1 供水泵的选择 以每次试验最大用水量选择供水泵。如果按 1 个单元有效降雨面积 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$,最大雨强 240 mm/h 计算,则每小时的用水量为 2.4 m^3 ;如果四个单元组合同时使用,总有效面积为 $2\text{ m} \times 20\text{ m}$,每小时的总用水量为 9.6 m^3 。根据设计喷头摆动宽度是 2.4 m ,而有效降雨的宽度 2 m ,即有 20% 是无效降雨,若将其考虑进去,则每个单元的用水量是每小时 2.88 m^3 ,4 个单元总用水量每小时 11.52 m^3 。根据单元组合及总用水量选择供水泵。

1.5.2 分水箱 容量 0.1 m^3 ,箱上装有一个与供水车或水泵供水管配套的进水接口,四个分水出水接口,以及一个控制压力的排水栓,每个分水接口分别供一个单元使用。

1.5.3 供水管 分两部分: (1)分水箱前, 配用供水设备的供水管, 以消防车供水时, 配用内径 50 mm 的软管。(2)分水箱后, 配用 3/4 或“1”的软管, 与梁架上喷头接管相连。

2 降雨特性与测定方法

2.1 降雨特性

较理想的人工模拟降雨装置所产生的降雨, 应与自然降雨相似, 而降雨的因子很多, 使其每个因子都相似, 在目前条件下很难实现。为此, 要抓住主要的降雨特性相似。例如, 通常被作为“降雨侵蚀力”的参数包含了雨滴直径 D 和雨滴降落速度 V 等因子。所以, 主要降雨特性包括降雨量、降雨强度、雨滴直径大小及其分布, 雨滴降落终点速度、降雨分布均匀性等。

2.2 测定方法

2.2.1 场地布设 本测定是根据原设计 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 为有效降雨面积, 在试验场地上, 选择 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 平地一块, $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 兼 18 代表性的坡地一块, 各地块均匀布设 15 个雨量筒, 如图 5, 进行平地与坡地两组降雨量分布测定试验。

2.2.2 动力供给 模拟降雨装置的驱动马达由一台直流稳压电源来供给, 马达的转速控制在 $40 \sim 60\text{ 转/分}$ 。

2.2.3 供水方式 根据水源情况, 可采用水泵供水, 水塔(或水池)供水以及消防供水车供水。不管何种方式供水, 都需要保证一定的供水压力, 供水压力的大小, 以满足喷头处的压力为准。喷头处压力, 一般为 $0.2 \sim 1\text{ kg/cm}^2$ 。

2.2.4 测定用的器材设备 主要有直流稳压电源, 消防供水车或水泵、压力表、雨量筒、量杯、秒表以及涂有色料的雨滴取样滤纸等。

3 测定结果与分析

3.1 降雨面积

喷头供水压力在 0.2 kg/cm^2 以下时, 有效降雨面积小于 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。降雨横向(宽度)可由喷头的摆动角度大小来调整。压力大于 0.2 kg/cm^2 , 降雨面积均大于 $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。

3.2 降雨量与降雨强度

雨量或雨强受供水压力的影响, 在一定压力范围内, 随着压力的增大而增加。喷头摆动时, 摆动速度对雨强影响很小。

3.2.1 供水压力与降雨强度的关系 从表 2 可以看出, 压力过低时, 喷水不能散开, 降雨分布不均匀; 压力增加, 喷水的散水性能变好。从 0.4 kg/cm^2 压力开始, 雨强随着压力的增加而增大, 增幅大小也比

较均匀。压力增加到 1.8 kg/cm^2 时, 雨强又有减小趋势。其原因是散水面增大, 有效降雨面上的降雨量减小, 即雨强减小。

3.2.2 坡面上的降雨强度 降雨装置设计的最大工作坡度为 25° ; 这里选择 18 的坡地进行测定。测定证明, 装置的稳定性较好, 雨强分布列于表 3, 雨强随压力增加而增大, 与表 2 作比较, 降雨分布的均匀性与平地基本一致。

表 2 供水压力与雨强、降雨分布均匀性

名称	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
压力/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.8	2.0
雨强/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.90	1.58	1.76	1.96	2.02	2.38	2.35	2.24	2.00	1.66
均匀系数/%	72.0	75.0	75.0	80.0	82.0	82.5	82.8	72.7	75.7	84.0
马达转速/($\text{转} \cdot \text{min}^{-1}$)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

表 3 坡地上的供水压力与雨强、降雨分布均匀性

名称	1	2	3	4	5
压力/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
坡度/($^\circ$)	18	18	18	18	18
雨强/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.18	1.54	1.62	1.70	1.70
均匀系数/%	64	72	77	83	83

表 4 转速与雨强关系表

名称	1	2	3	4
压力/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.2	0.2	0.3	0.3
转速/($\text{转} \cdot \text{min}^{-1}$)	40	60	40	60
雨强/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.82	1.90	1.96	1.97

3.2.3 马达转速与降雨强度 对摆动间歇式降雨装置来说, 马达主要用来驱动喷头往返摆动, 改善喷头喷水面积, 使降水横向面积扩大, 在单位面积上的降水量减少, 可将雨强控制在实用的雨强范围内。马达转速大小, 主要是改善雨滴大小分布, 对雨强大小影响甚小, 参看表 4。

3.3 降雨分布均匀性

降雨分布均匀性测定, 是在降雨面上布设一组雨量筒作为测点(图 5), 根据各测点的降雨量, 采用均匀性公式计算。

公式:

$$K = 1 - \left[\frac{(H_i - \overline{H})}{nH} \right]$$

式中: K ——均匀系数; H_i ——测点雨量; \overline{H} 各测点平均雨量; n ——测点数。

从表 2 可以看出, 随着压力的增加降雨均匀性随之改善, 特别是压力大于 0.8 kg/cm^2 时, 均匀系数在 80% 以上。

3.4 雨滴直径大小分布

雨滴直径的测定, 采用滤纸色斑测定法。先用 $\Phi 15\text{ cm}$ 的新华定性滤纸, 在滤纸上涂刷一层曙红与滑石粉混合色料, 作为降雨时雨滴取样用。取样后, 在取样滤纸上, 量出雨滴的色斑直径 D , 将不同大小的色斑直径分类统计出来, 由换算公式 $d = aD/b$ (计算公式中选用 $a = 0.322$, $b = 0.742$), 将色斑直径 D 代入, 得到各类雨滴直径 d 。然后分类统计, 计算出

不同直径的质量或体积的和,并求出它们在降雨总量中所占的百分数,最后根据累积百分数,得到雨滴的中数直径。

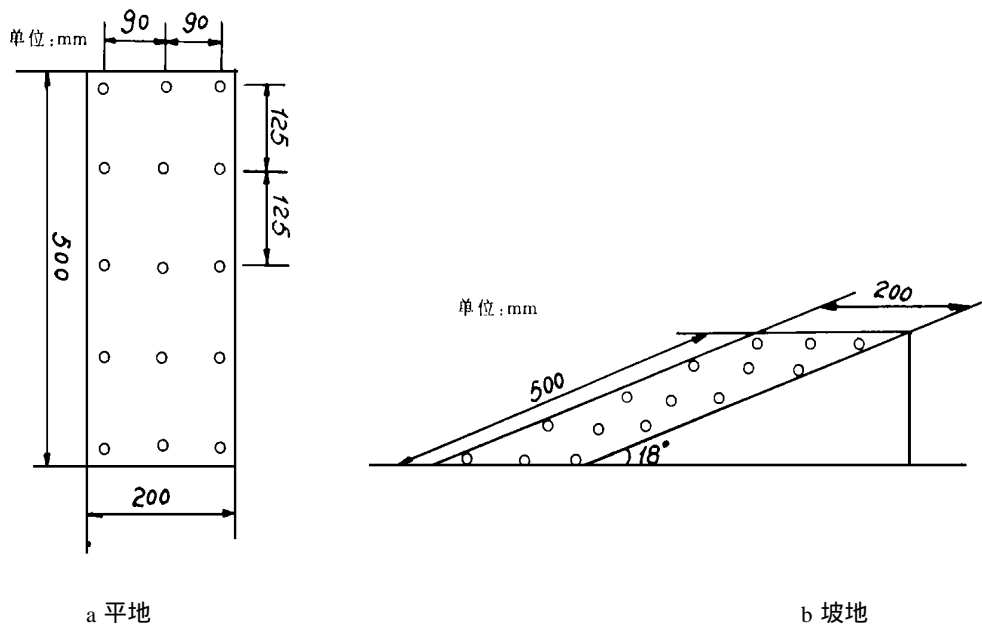


图 5 雨量筒的布设

从表 5 中可以看出,雨滴的中数直径,在一定的供水压力范围内,随着降雨强度的增加有所增大,其中,中数直径在 1.5 mm 以上,而直径在 2 mm 以上的雨滴,其累积重量的百分数在 25%~50% 之间,若参照其他一些学者的雨滴换算公式,与本公式计算结果比较,差值在 0.1~0.3 mm。如用 0.2 mm 来修正,其雨滴中数直径在 1.7 mm 以上,有的超过 2 mm。若与同雨强的天然降雨相比,雨滴中数直径接近天然降雨,总的来看,约为天然降雨的雨滴中数直径的 80% 以上。

3.5 雨滴下落终点速度

美国学者罗斯等人对于天然降雨雨滴的研究指

表 5 雨滴直径分布

名称	1	2	3	4	5	6
压力/(kg·cm ⁻²)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
雨强/(mm·min ⁻¹)	1.90	1.56	1.76	1.96	2.12	2.48
中数直径/实测值	1.66	1.59	1.40	1.44	1.47	1.50
mm 修正值	1.86	1.79	1.69	1.64	1.67	1.70
2 mm 以上的雨滴累积重量所占百分数/%	21.3	32.9	35.4	25.5	24.7	48.4

出,天然降雨雨滴大小的分布,波动在 0~6 mm,其相应的终点速度 2~2.9 mm/s,90% 以上雨滴所需要的相应降落高度为 7~9 m。根据美国、澳大利亚等国家的一些学者对雨滴下落速度研究,测定结果

指出,具有初速度的下喷式喷头,降雨高度达 2 m 时,就可满足不同直径的雨滴获得 2~2.9 mm/s 的终点速度。本降雨装置采用间歇下喷方式,降雨高度 2.4 m 及供水压力在 0.2~2 kg/cm² 时,所测定雨滴直径为 0~3 mm,个别超过 4 mm。根据测定,本降雨装置已满足此范围的雨滴,获得下落终点速度。

4 小 结

SR 型野外人工模拟降雨装置,属下喷摆动间歇降雨方式的装置。该装置采用轻型合金材料制成,结构简单,易于安装拆卸,运输方便,适于野外工作。根据对装置主要降雨特性的测定结果来看,主要降雨特性与天然降雨基本相似。

降雨装置的主要降雨特性归纳如表 6。

表 6 野外降雨装置主要特性

名 称	测定值	备注
降雨高度/m	2.4	
降雨面积/m ²	2×5	1 个单元面积
降雨强度/(mm·min ⁻¹)	1~2.5	
雨滴直径/mm	0.1~3	少数达 4 mm
雨滴中数直径/mm	1.7~2.0	
均匀系数/%	80%	
供水压力/(kg/cm ²)	0.2~2	
工作坡度/(°)	<25	

参考文献

1 Meger L. D. , McCune D. L. Rainfall simulator for runoff plots[J]. Agri. Engr. 1958, 39(10)
2 陈文亮 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持通报, 1988, 8(5)
3 范正成, 谢洪元 田间人工降雨机之回顾、研究及比较[J]. “中华水土保持学报”, 1991, 22(1): 9~20