
* 研 *
* 究 *
* 简 *
* 报 *

槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性

张光辉¹, 刘宝元¹, 李平康²

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京交通大学 机电学院, 北京 100044)

摘 要: 利用人工模拟降雨, 可以进行各种下垫面条件下土壤侵蚀与水土保持实验研究, 大大缩短了试验研究周期, 已成为室内与野外试验的重要技术手段, 是获取土壤侵蚀、水土保持效益、土壤侵蚀模型等相关研究数据的有效途径。在详细论述人工模拟降雨机的基本要求和类型的基础上, 重点论述了槽式人工模拟降雨机的结构、工作原理及其优缺点, 旨在促进我国人工模拟降雨机研制的步伐, 为土壤侵蚀与水土保持相关实验研究提供参考。

关键词: 人工模拟降雨机; 土壤侵蚀; 水土保持

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2007)06-0056-05

中图分类号: S157.1

Principles and Properties of Artificial Trough Rainfall Simulator

ZHANG Guang-hui¹, LIU Bao-yuan¹, LI Ping-kang²

(1. School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Many researches on soil erosion and soil and water conservation under various conditions can be conducted using artificial rainfall simulation. The research period can be greatly shortened with the aid of the technique. Rainfall simulation has already become an important technique for laboratory and filed experiments and an efficient approach to collecting data of soil erosion, soil and water conservation benefits, and soil erosion modeling. Based on the discussion of basic requirements and types of artificial rainfall simulator, the structure, principles, advantages, and disadvantages of trough rainfall simulator are analyzed in detail. The objective is to stimulate the processes of research and manufacture on rainfall simulator and to promote the progress of related researches in our country.

Keywords: artificial rainfall simulator; soil erosion; soil and water conservation

土壤侵蚀规律研究、水土保持措施效益分析与评价、土壤侵蚀预报模型的建立等都依赖于大量科学数据的观测、积累和分析, 室内模拟和径流小区为上述数据的获取提供了技术平台。然而, 依靠天然降雨收集相关数据具有很大的局限性, 特别是在我国北方降水比较稀少的广大地区, 由于降水少, 年内能产生径流的暴雨不多, 而产生径流的小区多为地表植被覆盖比较差的标准小区和坡耕地小区。产流小区类型比较单一, 严重影响了数据的实用性, 制约着水土保持科研的快速发展^[1]。

利用人工模拟降雨, 可以进行各种下垫面土壤侵蚀规律研究, 亦可解决设站观测几十年一遇的大暴雨问题, 从而大大缩短了试验研究周期^[2], 已成为室内

与野外试验的重要技术手段, 可加速土壤侵蚀、降雨产流及入渗等试验, 避免自然因素的影响, 在既定时间内迅速获得试验所需数据, 顺利完成研究目标^[3]。从 20 世纪 30 年代开始, 美国就广泛采用人工模拟降雨研究不同作物、土壤和农业管理条件下的土壤入渗、坡面产流和土壤侵蚀^[4-5]。1958 年 Meyer 和 McCune 研制了槽式人工模拟降雨机^[6], 随后被广泛应用于美国 USDA 及其它与土壤侵蚀相关的科学研究工作, 特别在美国国家土壤侵蚀实验室相关实验中得到了广泛的使用。1979 年 Foster 等人对 Meyer—McCune 的槽式人工模拟降雨机做了部分改进^[7], 改进以后的模拟降雨机性能更好, 运行更为稳定, 是美国普渡大学国家土壤侵蚀实验室装备的主要人工降

收稿日期: 2007-08-30 修回日期: 2007-09-14

资助项目: “十一五”国家科技支撑项目“水土流失动态监测与评价关键技术调控研究”(2007CB 407204); 国家重点基础研究发展规划(973)项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407204)

作者简介: 张光辉(1969—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn.

雨设施。20世纪90年代Scott和Norton对槽式人工模拟降雨机做了一定的改进,用PCV管替代了原槽式降雨机的回水水槽,增加了可加长的降雨机支架^[8],降低了降雨机的重量,但增加了降雨机安装的难度,水压调节和降雨机调试的难度都相应增加。我国从20世纪60年代就开始研制人工模拟降雨机,其中侧喷式人工降雨机应用较为普遍,侧喷式降雨器的最大优点在于单个喷头的雨滴分布比较好,同时造价比较低廉,但该降雨器费水,防风要求高,多个降雨器组合条件下的降雨调试比较麻烦。

从2004年开始,北京师范大学和北京交通大学在美国槽式降雨机的基础上,进行二次研发,分别为北京师范大学房山实验基地和中国科学院成都山地灾害研究所研制了10套和4套槽式人工模拟降雨机,经使用证明该降雨机具有优良的工作性能。本文在简要论述人工模拟降雨机的基本要求和类型的基础上,重点论述了槽式人工模拟降雨机的结构、工作原理及其优缺点,旨在促进我国人工模拟降雨机研制的步伐,促进相关研究工作的发展。

1 人工模拟降雨机的基本要求

人工模拟降雨机研制的目的是模拟天然降雨,并替代天然降雨进行相关科学研究,迅速获取实验数据。然而,天然降雨是一复杂过程,降雨雨滴分布、终点速度及降雨动能都随降雨强度的变化而变化,因而为人工模拟降雨的实现增加了难度。为了尽量模拟天然降雨,人工模拟降雨机应符合下列基本要求。

(1) 能满足最大、最小设计雨强及变雨强的要求。不同的实验对降雨强度的要求不同,因此,人工模拟降雨机所提供的降雨强度应具有较大的范围,可以满足一般实验的需要。随着降雨的持续,降雨强度会发生相应的变化,因此,降雨机应尽量可以模拟降雨过程的变化。

(2) 降雨的均匀性。为了减小实验误差,人工模拟降雨在观测范围内(如径流小区)应均匀分布。降雨均匀性可用均匀系数来反应,一般人工模拟降雨机的均匀系数应该在0.8以上。

(3) 相同雨强下的雨滴级配应与天然降雨的雨谱比较接近。天然降雨由很多直径大小不同的雨滴组成(1~7 mm),各类不同直径雨滴的比例与很多因素有关,特别是降雨强度。随着降雨强度的增大,大雨滴的比例增加,但当降雨强度足够大时,大雨滴的比例反而会出现减小的趋势。在人工模拟降雨机研制过程中,应充分分析降雨强度与雨滴分布的关系,特别是降雨强度与中值直径 D_{50} 之间的关系。

(4) 落地的雨滴速度应与天然雨滴的终点速度接近。落地速度是人工模拟降雨机设计中十分重要的一个参数,在天然条件下雨滴到达地表时都达到了相应的终点速度,终点速度与雨滴直径间呈幂函数关系,随着雨滴直径的增大而增大,因此在研制模拟降雨的过程中应为雨滴预留足够的降落高度,确保小雨滴可以达到终点速度。

(5) 相同雨强下的降雨动能应与同雨强的天然降雨比较吻合。降雨动能是细沟间侵蚀的动力源泉,对降雨动能模拟的好坏直接影响到模拟降雨机的质量,也直接影响到实验数据的准确性和可靠性。降雨动能是雨滴质量和落地速度的函数,如雨滴级配和终点速度模拟较好,则雨滴动能自然与天然降雨比较吻合,因此,降雨动能的要求基本上仍然是雨滴级配和终点速度要求的延伸。

(6) 降雨的稳定性和可重复性。人工模拟降雨机应具备良好的稳定性,同时也应具备长时间运行的优良性能。无论是室内实验还是野外实验,为了减小实验的随机性,多设重复实验,因此,人工模拟降雨机也应具有非常好的可重复性。

(7) 构造简单,便于运输,操作方便,造价低廉。人工模拟降雨机可能被用于室内、室外等不同的条件下,因而降雨机的结构应该简单,便于拆卸。所用材料应具有足够的强度,但重量不易很大,应便于运输和安装。

2 人工模拟降雨机的类型

经过几十年的发展,人工模拟降雨技术有了很大的发展,降雨机的类型多种多样,根据不同的分类标准可以划分为不同的类型。根据降雨形成的方式可以将人工模拟降雨机分为喷咀式和针管式2种类型。

喷咀式人工模拟降雨机是从喷咀或喷孔中把水喷射至空中,受空气阻力作用的影响,水流破碎形成不同大小的雨滴,降落至地表,其产生的雨滴有大有小,与天然降雨的雨滴比较相似。刘素媛等人研制的SB-YZCP人工模拟降雨装置即为典型的喷咀式降雨机^[9]。陈文亮等研制的SR型多喷头、多单元组合式的间歇降雨装置也属于喷咀式模拟降雨机^[10]。国内常采用的侧喷式降雨机也属于喷咀式降雨机^[11]。侧喷式模拟降雨机可通过更换孔板直径和调整水压力来改变降雨强度,因而无法实现不同雨强的连续变换,同时该装置喷出的水流到一定高度后以自由落体的形式降落,因而需要较大的降雨高度(如中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅的侧喷式降雨喷头高度为16 m),才能保证较小雨滴达到终点速

度,这给野外安装带来了诸多不便,同时降雨时受风的影响很大,一般在早晚时分比较适合做模拟降雨实验。喷咀式模拟降雨机水流破碎成雨滴的方式有直流和旋转流两类,公园内的喷泉是直流喷咀器的最好范例,而日本的 F 型喷头为典型的旋转式喷咀器,水流旋转着流出喷头。喷咀式的水流破碎方式分为有碎流板和无碎流板两种。而有碎流板者又有部分碎流和全面碎流之区别。本文介绍的槽式人工模拟降雨机采用无碎流板的喷咀,其碎流过程通过喷咀内光滑的弧形凹陷来实现。

针管式模拟降雨机是水流流过众多针头或细管形成雨滴。由于针头或细管的直径是均匀的,所以产生的雨滴直径也是均匀的。高小梅等人在研究核素迁移过程中所使用的降雨装置即为典型的针管式模拟降雨机^[12]。由于针管式降雨机所产生的雨滴是均匀的,与天然降雨的雨滴分布相差甚远,所以一般在土壤侵蚀、水土保持相关研究中使用较少。

根据水流喷射的角度,可以把人工模拟降雨机分为侧喷式和下喷式 2 种。常用的侧喷式人工模拟降雨器就是侧喷式的典型,水流经碎流板遮挡以后呈一定角度向上喷射,到最大高度后呈自由落体运动降落地表,水滴的运动轨迹大致呈抛物线形式。因为是自由落体运动,所以需要的高度就比较高。为了降低降雨机的高度,很多降雨机采用了下喷的形式产生降雨,由于水滴离开降雨器时有一定的初速度,所以比较容易达到终点速度,相应地降低了降雨机的高度,本文介绍的槽式降雨机即为下喷式降雨机。

根据控制降雨强度的方式,可以将人工模拟降雨机分为转臂式、转盘式和摆动式 3 种。转臂式降雨机由很多安装有多个喷头的旋转臂组成,通过调整旋转臂转动的速度可以实现降雨强度的控制。转盘式与转臂式比较类似,但降雨是通过旋转盘的开口处降落

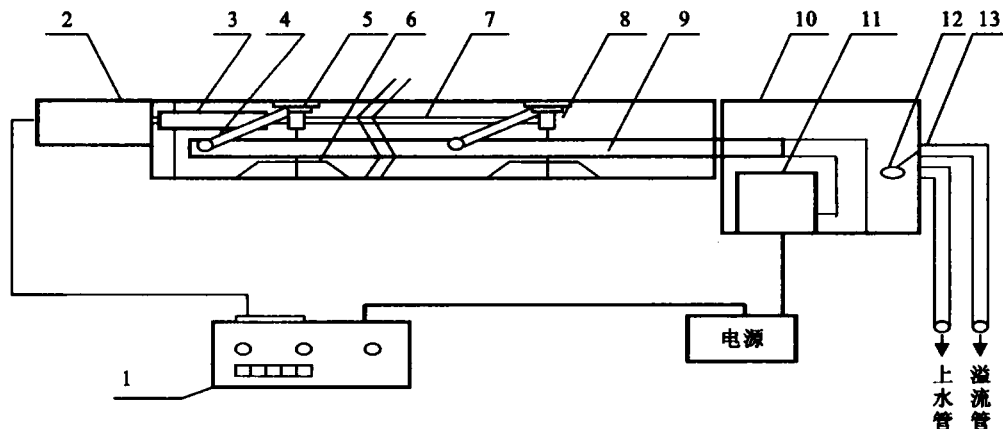
到地表。摆动式是通过调整喷头摆动的频率来控制降雨强度的一种降雨机,本文介绍的槽式降雨机即为这种类型。

3 槽式人工模拟降雨机的工作原理

3.1 槽式人工模拟降雨机的结构

槽式人工模拟降雨机由水槽及喷头等降雨系统、控制器、动力系统和供排水系统组成,其结构示意图见图 1。水槽是槽式模拟降雨机的主体,宽为 32 cm,深为 25 cm,水槽的长度由降雨喷头的个数决定。水槽既是降雨喷头的载体,也是多余水流流回供水箱的流路。喷头通过支架固定在水槽上边,喷头可以顺旋转轴沿水槽方向摆动,喷头的进水口与降雨机的供水管相连,降雨时在驱动连杆的作用下,可以顺长度方向摆动。喷头与喷头的间隔距离为 1.1 m,喷头端下方是降雨的出口(在水槽底部),出口四周设有呈 45° 角的降雨隔板,喷洒在出口内的降雨降落到地表,而喷洒到出口外的水历经水槽流回供水箱。喷头的个数可以根据实验对降雨机长度的需求来确定。目前研制的槽式降雨机都是 5 个喷头,所采用的喷头为美国制造的 Veejet 80100(或 Veejet 80150)型降雨喷头。进入喷头的水流先经过一呈“8”字型的稳流器,然后进入一连续的弧状凹陷(起到破碎水流形成雨滴的作用),再从椭圆型的喷口处喷出。

控制器是降雨机的重要组成部分,它起到控制动力系统、供水系统和降雨强度的作用。图 2 给出了控制器的正面和背面界面,每台控制器可控制两个降雨机。降雨强度从 S_1 到 S_6 逐渐增大,其中 S_1 为空挡(即降雨强度为 0),而其余 5 个都可以通过单摆(喷头摆动 1 次停顿 1 次)和双摆(喷头连续摆动 2 次再停顿 1 次)选择变换降雨强度,总体来说该降雨机可以提供 11 种不同的降雨强度。



1. 控制器; 2. 驱动箱; 3. 可调整连杆; 4. 摆动杆; 5. 喷头(共 5 个); 6. 降雨隔板;
7. 驱动连杆; 8. 水槽; 9. 供水管; 10. 供水箱; 11. 潜水泵; 12. 球阀及浮子; 13. 溢流孔及溢流管

图 1 槽式人工模拟降雨装置示意图

动力系统包括电机、链传动、离合器、四连杆机构和驱动连杆 5 部分。降雨机采用 YCGT90W 可逆减速电机,额定功率为 90 W,额定转速 100 r/min。17 齿的电机齿轮通过节距为 12.75 mm 的链轮与 23 齿的离合器齿轮相连,离合器的另一端与四连杆机构连接,驱动连杆一端与四连杆机构连接,另一侧和降雨喷头连接。

供排水系统包括降雨机内部供排水和地面供水两部分。降雨机供水系统由供水箱、上水管、浮球阀、潜水泵、供水管及压力表组成。地面供水包括体积较大的水箱、水泵及分水四通,可同时为 2 个降雨机供

水,为了防止供水过多,憋坏供水箱内的浮球阀,地面供水部分必须采用分流措施,让部分多余的水流直接流回地面的大水箱。

降雨机上的供水箱固定于水槽的一端,长 540 mm,宽 300 mm,高 620 mm。浮球阀位于供水箱内,直接与上水管相连,主要起到控制供水箱内水位的作用,当水位达到一定高度后,浮球阀关闭停止供水,当水位下降后浮球阀打开供水管重新供水。潜水泵置于供水箱底部,通过水管直接与供水管相连,供水管上有 5 个出水管和 5 个压力表,出水管直接与降雨喷头连接。

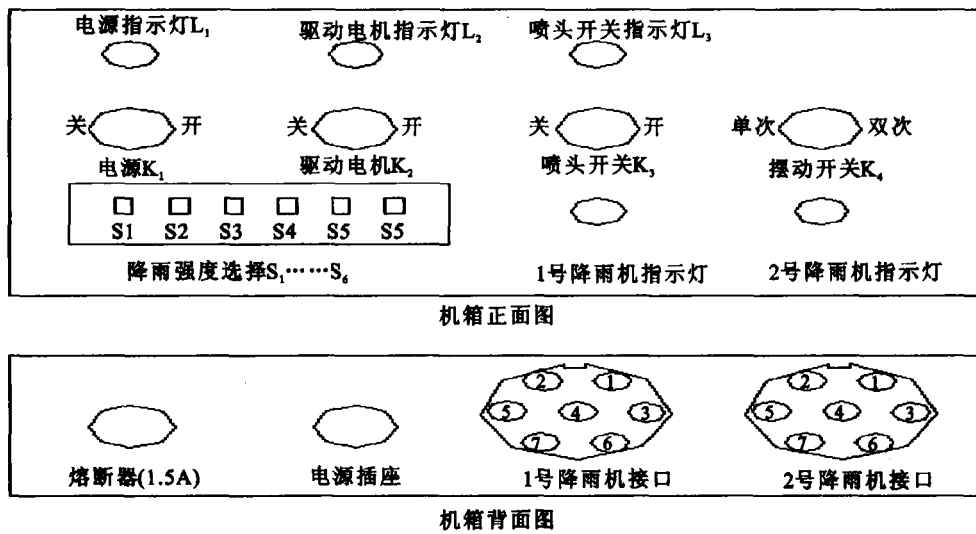


图 2 槽式人工模拟降雨机控制器界面

3.2 槽式人工模拟降雨机的工作原理

槽式人工模拟降雨机主要通过控制喷头摆动的频率来控制降雨强度。电机和水泵的控制由电源控制板输出 220V AC 电流直接进行开关控制,电源控制板还直接输出 24V AC 电流控制离合刹车器(图 3)。对降雨强度的控制主要是对进入离合刹车器脉冲信号频率和单个脉冲占空比的合理控制。脉冲信号由 555 继电器产生,通过控制与其相连电阻和电容的大小,即可控制单位时间内输出脉冲的个数,达到控制脉冲信号频率的目的。

单个脉冲的通电时间(即占空比)的控制,是通过 555 继电器输出的 74LS123 单稳态触发器的输入信号,控制可变电阻和电容的相对大小,就可以控制单个脉冲的通电时间^[13]。长期研究发现,当地面接受 266 次/min 降雨时,基本可以模拟强度较大的天然降雨,满足土壤侵蚀与水土保持相关实验的需求,因此,槽式人工模拟降雨机每分钟最大的摆动频率是

266 次,相应的地面每分钟也接收了 266 次雨滴的扫描,此时对应着最大的降雨强度。那么此时喷头摆动一次所需要时间为: $60/266=0.226$ s。当脉冲通电时间小于 0.266 s,喷头摆动 1 次停顿一定时间后开始下次摆动,这时是单摆。当脉冲时间大于 0.66 s,而小于 0.266×2 s 时,喷头连续摆动两次,此时为双摆。表 1 给出了槽式人工模拟降雨机不同摆动情况下喷头摆动的次数、间歇时间以及地面接收降雨的次数。

降雨时,通过电源控制板启动上水水泵,向供水箱内输水,当供水箱内水位足够高时,开启供水箱内的潜水泵向供水管内供水,供水管内的水通过喷头回到水槽底部,流回供水箱,当供水持续一阵以后即可启动喷头摆动,开始降雨。降雨强度的大小可以根据实验需求,通过控制器上的挡位和单双摆选择就可以控制降雨。为了获得不同降雨过程,可以根据实验需要,随时调整喷头摆动频率,获得不同降雨过程。

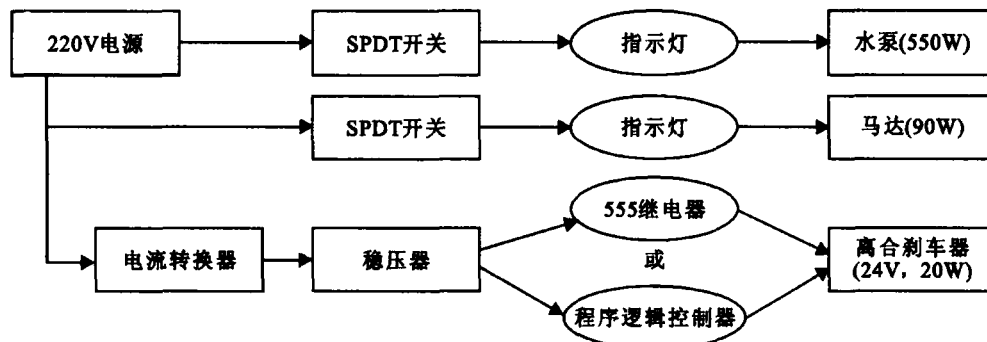


图3 槽式人工模拟降雨机控制系统示意图

表1 槽式人工模拟降雨机喷头摆动次数及间歇时间

| 地面接收雨次/ (次·min ⁻¹) | 喷头摆动 时间/s | 离合器起动次数/ (次·min ⁻¹) | 每次喷头 间歇时间/s |
|-----------------------------------|--------------|------------------------------------|----------------|
| 0 | 0 | 连续起动 1 h | 无降雨 |
| 25 | 5.65 | 25 | 2.174 |
| 50 | 11.30 | 50 | 0.974 |
| 75 | 16.95 | 75 | 0.574 |
| 100 | 22.60 | 100 | 0.374 |
| 125 | 28.25 | 125 | 0.254 |
| 150 | 33.90 | 150 | 0.174 |
| 175 | 39.55 | 175 | 0.117 |
| 200 | 45.20 | 200 | 0.074 |
| 225 | 50.85 | 225 | 0.041 |
| 266 | 60.00 | 266 | 0.000 |

3.3 槽式人工模拟降雨机的特点

经过实验率定和实际使用发现,槽式人工模拟降雨机具有以下优点:(1)雨强稳定。通过控制器调节喷头摆动的频率,从而实现降雨强度在较大范围内的变化和不同降雨强度的快速转换。(2)降雨均匀性较好,均匀系数可以达到0.85以上。(3)雨滴分布特性接近于天然降雨。当降雨机高度为3m左右时,绝大部分雨滴(4mm左右)可以达到终点速度。(4)雨滴打击地表的角度与天然降雨比较相似。在同等降雨条件下,模拟降雨的动能与天然降雨的动能比较接近;(5)降雨的可重复性好;(6)降雨机的重量较轻,安装、拆卸和运输方便;(7)降雨机采用循环水,用水量较少。(8)降雨机的性能稳定、操作方便。综上所述,槽式人工模拟降雨量机具有众多优点,可以满足土壤侵蚀、水土保持及相关研究对模拟降雨的需要,具有很好的应用推广价值。

然而,槽式人工模拟降雨机也存在一定的不足之处。到目前为止,槽式降雨机的价格比较昂贵,从美国直接进口售价在 $1.5 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^5$ 元之间,而由北京师范大学和北京交通大学自行研制的,每台造价也在 $6.0 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^4$ 元之间,价格仍然比较

昂贵。与其它降雨机比较类似,槽式人工模拟降雨机也未实现降雨强度的连续变化,只用11个间断的降雨强度来模拟降雨过程,与实际降雨过程还存在一定差异,这是槽式人工模拟降雨机需要改进的地方。

[参 考 文 献]

- [1] 袁爱萍. 美国人工降雨模拟设备的引进与应用[J]. 北京水利, 2004(6): 36—37.
- [2] 范荣生, 李占斌. 用于降雨侵蚀的人工模拟降雨装置实验研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 38—45.
- [3] 王洁, 胡少伟, 周跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 188—190, 194.
- [4] Mutchler C K, Hermsmeier L L. A review of rainfall simulators[J]. The Transactions of America Society of Agricultural Engineers, 1965, 8(1): 67—68.
- [5] Moldenhauer W C. Rainfall simulation as a research tool [C]//Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop (Tucson, Arizona). USDA-SEA-AR, ARM-W-LO, 1979: 90—95.
- [6] Meyer L D, McCune D L. Rainfall simulator for runoff plots[J]. Agric. Engr, 1958, 39: 644—648.
- [7] Foster G R, Eppert F P, Meyer L D. A programmable rainfall simulator for field plots[C]//Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop (Tucson, Arizona). USDA-SEA-AR, ARM-W-LO, 1979: 45—59.
- [8] Blanquies J, Scharff M, Hallock B. The design and construction of a rainfall simulator[C]//International Erosion Control Association, 34th Annual Conference and Expo., Las Vegas, Nevada, February 2003: 24—28.
- [9] 刘素媛. SB-YZCP人工降雨模拟装置特性分析[J]. 中国水土保持, 1999(5): 18—20.
- [10] 陈文亮, 唐克丽. SR型野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 106—110.
- [11] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177—178.
- [12] 高小梅, 李兆麟, 贾雪, 等. 人工模拟降雨装置的研制与应用[J]. 辐射防治, 2000, 20(1—2): 86—90.
- [13] 郑宏伟, 李平康. 一种新型人工模拟降雨实验装置的研制[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(4): 39—43.