

人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用

王 洁, 胡少伟, 周 跃

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 利用人工模拟降雨装置进行室内与野外试验已成为水土保持研究的一个重要手段。用人工模拟降雨方法可以加速土壤侵蚀、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, 顺利完成计划试验。主要介绍了我国人工模拟降雨装置在水土保持方面应用的研究近况、模拟降雨装置的主要设计技术参数, 以及本实验室于2003年研制成功的Kust03-1型人工模拟降雨装置在云南山地的应用。

关键词: 人工模拟降雨; 模拟降雨装置; 水土保持; 设计技术参数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)04-0188-03

Application of Artificial Simulation of Rainfall
Devices to Soil and Water Conservation

WANG Jie, HU Shao-wei, ZHOU Yue

(The Faculty of Environment Science and Engineering, Kunming
University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: It is an important measurement to research soil and water conservation by artificial simulation of rainfall device in the indoor and field experiments. Using the method of artificial simulation of rainfall can accelerate the experimental process of soil erosion, rainfall flow and infiltration and avoid the influence of natural factors. It can quickly attain the experimental data in the special time and favorably accomplish the planned experiments. The research advancements of its application in soil and water conservation and the mainly design technical parameters of artificial simulation of rainfall devices in China were summarized. Kust03-1 artificial simulation of rainfall device which was successfully manufactured by our laboratory research team in 2003 applied in mountainous region of Yunnan Province was presented.

Key words: artificial simulation of rainfall; simulation rainfall device; soil and water conservation; design technical parameter

在水土保持研究工作中, 利用天然降雨进行野外试验径流小区土壤流失量的观测是普遍采用的方法。要得出定量的结果, 需有足够的系列资料和可靠的数据, 积累年限一般长达几年甚至十几年。用人工模拟降雨方法往往可在几天之内得到不同条件下的水文特征和水保效果^[1]。人工模拟降雨方法可以弥补在自然降雨条件下, 因环境变化而无法得到试验期内计划的研究结果, 或进一步补充论证在自然降雨环境下得到的结果^[1]。

本文将主要对我国人工模拟降雨装置在水土保持方面应用的研究近况以及模拟降雨装置的主要设计技术参数进行综述。

1 人工模拟降雨装置的用途

早在1920年美国就已开始应用人工模拟降雨方式对坡面产流和土壤侵蚀过程进行试验研究。从50年代开始, 我国首先应用人工模拟降雨进行入渗试验。近年来, 引进和研制

了各种类型的人工降雨器并应用于室内与野外试验^[2]。人工模拟降雨试验是在径流小区试验的基础上发展起来的。固定小区观测虽是土壤侵蚀定量测定最准确的方法, 但有难以克服的弊病, 径流小区试验依赖于天然降雨。天然降雨是复杂多变的, 尤其在年平均降雨量少且分布不均匀的干旱、半干旱地区, 更易受到气候的影响。因而在短期内不可能进行多项多次观测试验, 积累更多所需资料^[3]。基于实验室尺度的研究比坡面尺度的研究具有经济、便捷、可控等优点^[4]。因此, 利用模拟降雨装置进行试验已成为水土保持领域不可或缺的一个重要研究手段。模拟降雨装置的应用主要涉及水土保持业、农业及林业等领域的研究。人工模拟降雨装置的主要特点在于:

- (1)减少径流小区设备和装置设备投资;
- (2)节约试验经费, 加快试验进程;
- (3)创造各种试验条件, 增加试验的可行性和数据的可靠性。

X 收稿日期: 2004-09-16

基金项目: 云南省自然科学基金(2002D0017M); 国家水土保持生态修复云南大姚试点工程生态质量动态研究

作者简介: 王洁(1980-), 女, 硕士生, 主要研究方向: 生态恢复、水土保持。

2 人工模拟降雨装置研究现状

2.1 人工模拟降雨装置的分类

人工模拟降雨装置主要有四种形式:喷嘴式、喷洒式、悬线式和针头式^[2]。

(1) 喷嘴式:水从喷孔或喷嘴中喷出,在空中分散成大小不一的水滴降落到地面,这种形式的雨滴直径是不均匀的,雨强可通过不同大小的孔径或供水压力来调节。

(2) 喷洒式(管网式):是在一些平行的细管上钻有一些小孔,水从孔中喷出,以雨滴形式落到地面,原理与喷嘴式相似,但不及喷嘴式灵活。

(3) 悬线式:水在悬线终端以水滴形式离开,降落到地面。这种形式模拟的雨滴是均匀的,且初始降落速度为0。雨滴大小与水压力无关,仅与悬线的粗细有关。

(4) 针头式:水滴通过针头末端落到地面,情形及水滴特性类似于悬线式。

目前我国主要应用的人工模拟降雨装置为喷嘴式和针头式模拟降雨机。

2.2 我国人工模拟降雨装置的研制现状

我国相关领域的科研人员已经研制出了适于室内与野外各种试验要求和研究目的的人工模拟降雨装置。其中主要有以下几种:

(1) 孙超图等^[5]研制的掺气喷洒式极小雨强降雨装置,主要用掺气方法减小喷洒式降雨器的降雨强度,用移动方法提高降雨均匀度,从而使雨强达0.013~0.36 mm/min范围,均匀度达到0.9以上。这是国内外所有模拟降雨器未曾达到的指标。全套装置由掺气式喷头、喷车、供水系统、供气系统、移动控制系统组成。该装置已用于“干旱地区雨水利用”试验研究中。为寻找低投资高效率集流下垫面提供了科学依据,也为开展干旱水文的基础研究提供了一种有效的科学手段。

(2) 刘素媛等^[6]经5年研制、3年运用和3万个数据率定研制成功的SB-YZCP(野外移动、组合、侧向、喷洒式)人工降雨模拟装置。该装置由模拟降雨水车、塔架式降雨机、电控阀门、电子监测仪表以及相应的管路组成。该装置为多重组合式结构,适用于野外不同天然植被的水土流失观测。组合式喷头适用于各种雨型的模拟降雨,喷头开启与关闭自如、灵敏迅速,一般10 s内即达到稳定状态。

(3) 陈文亮等^[7]研制的SR型野外人工模拟降雨装置是一种多喷头、多单元组合式的间歇降雨装置。其结构主要包括:降雨喷头、降雨座架、驱动机构、动力系统和供水系统。该装置在喷头处辅以使喷头往返摆动的机械传动装置,可增加喷头的散水面积和均匀度。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。装置采用铝合金材料制成,结构简单,易于安装拆卸,适用于野外工作。

(4) 石生新等^[8]采用野外人工降雨的方法,研究了高强度降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响。喷洒器为单向折射式,出水口为不同直径活动孔板,可更换。用2 940 W柴油机配喷灌机加压取水,通过闸阀和更换出水孔板控制雨强,整个降雨区架设风障,防止雨滴飘拂,降雨强度78 mm/h。

(5) 高小梅等^[9]研制的人工模拟降雨装置,采用医用注射针头在一圆圈内振动洒落水滴模拟降雨。经过两年多现场

试验中的使用,证明它具有降雨强度可变范围宽(小降雨器2~100 mm/h,大降雨器4~100 mm/h),降雨强度下限低(小降雨器2 mm/h、大降雨器4 mm/h)和性能稳定等特点。与采用喷嘴喷淋的装置相比较,便于控制降雨面积、降雨量和总给水量。该装置能满足现场核素迁移试验使用要求,也可用于其他需要模拟降雨的试验研究中。雨强可变范围满足2~100 mm/h要求,给定水滴落差为0.5 m。

(6) 贾天会等^[10]在对坡耕地水土流失试验研究中,采用单喷头变雨强模拟降雨器,面积为6 m×2.5 m的移动式径流小区,四周用1.5 mm厚的铁板作边界,小区下方设集流槽并与集流桶相连。

(7) 叶翠玲等^[11]针对铁路建设过程中的典型坡面进行了野外人工模拟降雨试验,以定量研究铁路施工引起的水土流失量。试验采用中国科学院地理所的下喷式模拟降雨机。有效降雨面积为5 m×2 m,采用率定的雨强0.72~1.2 mm/min。试验过程中,由于受外界因素的影响,实际雨量用量雨桶测得。

(8) 刘纪根等^[12]提出了采用人工模拟降雨试验数据直接计算临界抗剪切应力的方法。试验采用中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的双向对喷式人工模拟降雨装置,降雨过程由计算机系统自动控制,降雨高度14 m。试验降雨强度控制在100 mm/h。试验土槽长8 m,宽3 m,深0.3 m,坡度可在0~30°之间调整。此试验在室内进行。

(9) 吴钦孝^[13]在黄土丘陵区草灌植被的减沙效应及其特征的试验中采用中国科学院水利部水土保持研究所的组合侧喷式野外人工降雨装置,降雨时两侧喷头座架之间距离为7 m,喷头高8 m,喷头出水高度1.5 m,使降雨雨滴终点速度近似天然降雨的速度。供水压力由压力表控制,雨强主要通过孔板的孔径来调节。

(10) 沈波等^[14]在对路基压实黄土坡面降雨冲蚀试验研究中,采用西安理工大学水资源研究所室内人工降雨系统,该装置离地面高12 m,X型喷洒式降雨喷头,改变喷口的大小和进水管压力,喷洒出不同降雨强度(I=0.2~4.5 mm/min),降雨强度均匀度可达0.7以上,局部小面积经仔细微调后降雨强度均匀度可达0.95上,雨滴动能基本同天然降雨相似。降雨开始与结束全变化过程由电脑自动控制。

(11) 赵西宁等^[15]利用有压给水式人工模拟降雨装置进行降雨入渗试验。研究了不同耕作管理措施对坡耕地降雨入渗的影响,并采用有限差分法对入渗过程进行数据模拟。结果表明,土壤入渗率的计算值与实测值吻合较好,且耕作管理措施可明显增加坡面土壤的水分入渗。

(12) 蔡强国等^[16]采用上喷往复式模拟降雨器(雨滴降落高度为7 m),通过间隔为11 h的二次人工模拟降雨和冲蚀槽试验研究10种土壤的侵蚀过程,发现在第二次降雨中大多数土壤出现了细沟侵蚀形式。土壤理化分析及多元逐步回归分析结果表明,土壤颗粒组成、有机质含量、铁铝含量等因素对切沟侵蚀的影响表现不明显,而与土壤团聚体有关结构指标、切沟侵蚀、产流产沙速率及总量呈显著相关关系。分析表明,团聚体分散度、崩解速率与渗透系数之比两个指标能较好地预测切沟侵蚀发生的可能性,同时也能很好地预测侵蚀产沙量。

3 人工模拟降雨装置的主要设计技术参数

模拟天然降雨应满足一定的相似条件。对于降雨径流的相似性条件,只要满足降雨均匀性、雨强即可。而对于降雨侵蚀相似性条件,要求模拟降雨满足^[2]:

(1)均匀性与天然降雨一致(天然降雨均匀度一般大于80%)。

(2)雨滴中径和终点速度应达到相应天然降雨雨强下的中径和终速。

(3)能模拟天然降雨过程和雨滴谱过程。目前我国人工模拟降雨装置主要的设计技术参数为降雨均匀系数、降雨强度、雨滴动能和雨滴中数直径。

3.1 降雨均匀系数

测定降雨均匀系数的方法是在降雨面上布设一组雨量筒作为测点,根据各测点的降雨量,采用均匀性公式计算。

$$k=1-\frac{6}{n}\frac{\sum_{i=1}^n\hat{u}x_i-\bar{\hat{x}}\hat{u}}{\bar{n}\bar{x}} \quad (1)$$

式中:k——均匀系数; x_i ——测点雨量,mm; \bar{x} ——各测点平均雨量,mm;n——测点数。

根据室内或野外试验的要求,目前我国的模拟降雨装置的均匀度一般都大于0.8以上^[1]。

3.2 降雨强度

模拟降雨装置性能的好坏关系到试验能否顺利进行和数据的可靠性。目前我国的模拟降雨装置的降雨强度主要是通过控制供水压力和调节供水量来实现的^[1]。喷嘴式和喷洒式模拟降雨装置主要是通过控制供水压力来实现的,悬线式和针头式模拟降雨装置主要是通过调节供水量来实现的。

降雨强度受供水压力的影响,在一定压力范围内,随着压力的增大而增加。以SR型野外人工模拟降雨装置为例,压力过低时,喷水不能散开,降雨分布不均匀;压力增加,喷水的散水性能较好。从0.4 kg/cm²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/cm²时,雨强又有减小的趋势。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^[7]。

针头式模拟降雨装置以中科院地理所的模拟降雨装置以及中国辐射防护研究院与日本合作研制的模拟降雨装置为代表,小雨强的装置主要是通过改变针号和针数来实现模拟较宽范围的降雨强度,大雨强的装置主要是通过调节供水量和调节振动台的频率来实现不同雨强的效果。这种模拟降雨装置的雨强范围在2~100 ml/h^[9]。

3.3 雨滴动能

美国学者罗斯等人关于天然降雨雨滴的研究表明,天然降雨雨滴大小的分布,波动在0~6 mm,其相应的终点速度为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的研究,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^[7]。

3.4 雨滴中数直径

雨滴直径一般采用色斑测定法测定。先在定性滤纸上涂刷一层曙红与滑石粉混合色料用于雨滴取样。取样后,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 $d=aD^b$ (式中:a=0.322,b=0.742)算出。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^[7]。

4 人工模拟降雨方法在云南山地的应用

4.1 云南山地的侵蚀现状

云南是一个多山省份,由于盆地、河谷、丘陵、山地、高原相间分布,各类地貌之间条件差异很大,类型复杂多样。全省土地面积按地形看,山地占84%,高原、丘陵约占10%、坝子(盆地、河谷)占6%。云南山地地势陡峭险峻,土壤侵蚀严重。采用径流场等观测方法具体操作困难,成本较高,并且常会受时间和地域等条件的限制。采用人工模拟降雨方法可以快速、高效的在短时间内得到不同条件下的水文条件和水保效果,可以有效的控制实验进程,缩短实验周期。

4.2 建设项目扰动土壤

建设项目工程扰动土壤具有临时、多变、零散等特点,采用常规观测时,在时间、地点等方面很难满足观测要求,且建设项目人工干扰大,制约了常规观测应用,而使用人工模拟降雨装置可以在短时间内取得小范围、不同下垫面工程扰动土壤侵蚀资料。

4.3 Kust03-1型人工模拟降雨装置

本实验室采用的Kust03-1人工模拟降雨装置由降雨喷头、降雨座架、动力系统、供水系统四部分组成,喷头包括喷头体、出流孔板和碎流档板等构件,出流孔板的孔径范围在3~15 mm之间,降雨座架可提供3 m、4.5 m、6 m的降雨高度,采用两相和三相潜水泵结合使用,提高降雨装置的灵活性和实用性。供水水箱利用角钢、扁铁、木板和塑料薄膜组合而成,便于拆卸和搬运,各部分之间采用耐压橡胶管连接。本装置可采用单喷、双喷或对喷方式。经实地调试,采用两相潜水泵,室内降雨有效面积3 m×4 m到3 m×6 m,降雨压力可达0.16 MPa,平均雨强在10~90 mm/h,降雨均匀度最低为78.6%,最高达98.6%。

4.4 目前开展的工作

(1)利用人工模拟降雨进行工矿区垂直侵蚀的研究。工矿区垂直侵蚀是工矿区一种特殊的侵蚀形式,是工矿区松散堆积体产生的向下侵蚀方式,对工矿区的生产安全、土壤侵蚀、环境污染及工矿区生态恢复重建有着重要影响。利用人工模拟降雨可以对垂直侵蚀发生的机理、状况及在不同情况下发生的程度进行研究,找出其特点、规律。

(2)对建设项目工程扰动土壤侵蚀状况的研究。工程建设项目对地表产生强烈的扰动,造成地表裸露,产生大量松散堆积土壤,从而引起严重的土壤侵蚀。利用人工模拟降雨可以快速取得工程建设项目不同范围、不同下垫面土壤侵蚀资料,为水土保持措施的采用提供依据。(3)对山区复杂地形地貌侵蚀状况的定量研究。云南地处山区,地势险峻,土壤侵蚀严重,采用人工模拟降雨对地形地貌侵蚀状况进行研究,对云南土壤侵蚀状况调查和土壤侵蚀标准的制订有着重要意义。

5 结 语

由于天然降雨观测的时限很长,甚至几十年还难遇到一两次希遇暴雨,且天然降雨的各种因素变化很大,给分析工作带来一定的难度,因此研制人工模拟降雨装置用于水土保持研究工作可以弥补天然降雨的不足,加快研究进程,提高

[5] 冉大川,刘滨,等.泾河流域水沙变化的水文分析[J]. 人民黄河,2001,23(2): 15- 21.

[6] 冉大川,刘斌,等.泾河流域水土保持措施减水减沙分析[J]. 人民黄河,2001,23(2): 6- 8.

[7] 吴炳方,等.应用遥感及地理信息系统进行植被制图[J]. 环境遥感, 1995, 10(1): 30- 37.

[8] JOFCA. Proceedings of the workshop on utilization of remote sensing in site assessment and planning for rehabilitation of logged-over forest[C]. Indonesia, Cisarua, Bogor, 1995. 25- 28.

[9] 李晓琴,等.北京山区植被覆盖率遥感制图与景观格局分析[J]. 国土资源遥感, 2003, 15(1): 23- 29.

[10] O'Neil R V, Hunster C T, Jones K B, et al. Monitoring environmental quality at the landscape scale: using landscape indicators to assess biotic diversity, watershed integrity, and landscape stability[J]. Bioscience 1997, 47(8): 513- 519.

[11] Deering, D W, Rouse, J W, Haas, R H, et al. Measuring forage production of grass units from Landsat MSS data[J]. Environment, 1975. 1169.

[12] Asrar G, Kanemasu E T, Yoshida M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle[J]. Remote sense Environment, 1985, 17: 1- 11.

[13] Chen J M, Cihlar J. Retrieving Leaf Area Index of boreal conifer forest using Landsat TM images[J]. Remote Sense Environment, 1996, 55: 153- 162.

[14] Kanemasu, T, Rosenthal, U D, Raney, R J, et al. Evaluation of an evaporation model for Corn[J]. Agron. J. 1977, 69: 461 - 464.

[15] Kite, G W, Spence, C D. Land cover NDVI, LAI, and evapotranspiration in hydrological modeling[A]. In: Kite, G W Pietroniro, A, Pultz, T (Eds.) Application of Remote sensing in Hydrology[C]. Proc. Synp. No. 14, NHRI, Saskatoon. Canada. 1995, 223- 240.

[16] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327- 333.

[17] McGarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure[M]. Corvallis: Oregon State University, 1993.

[18] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 100- 109.

[19] 王宪礼, 肖笃宁, 布仁仓, 等. 辽河三角洲湿地景观格局分析[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 318- 323.

(上接第 190 页)

科研效益^[2]。基于实验室尺度的研究比坡面尺度的研究具有经济、便捷、可控等优点。利用人工模拟降雨装置进行室内与野外试验已成为水土保持研究的一个重要手段,但在农业和林业等领域还未得到广泛应用。对人工模拟降雨装置的研制可以从降雨均匀系数、降雨强度、雨滴动能和中数雨滴直径等主要设计技术参数着手。

参考文献:

[1] 任树梅,刘洪禄,顾涛.人工模拟降雨技术研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2003, (3): 73- 75.

[2] 吴长文,徐宁娟.摆喷式人工降雨机的特性试验[J]. 南昌大学学报, 1995, 17(1): 58- 66.

[3] 岳红光,曲艳杰.用人工降雨法进行土壤侵蚀的研究[J]. 吉林林学院学报, 1998, 14(4): 208- 211.

[4] Gary James Sheridan(B. App. Sci). Predicting Hillslope Scale Erodibility And Erosion On Disturbed Landscapes From Laboratory Scale Measurements[R]. School of land and Food And Centre for Mined Land Rehabilitation, The, University of Queensland, 2001.

[5] 孙超图,解建宝,李占斌.掺气喷洒式极小雨强降雨装置试验研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(4): 91- 95.

[6] 刘素媛,韩奇志,聂振刚等. SB—YZCB 人工模拟降雨装置特性及应用研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 47 - 53.

[7] 陈文亮,唐克丽. SR 型野外人工降雨模拟装置[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 106- 110.

[8] 石生新. 高强度人工降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响[J]. 山西水利科技, 1996, (3): 77- 80.

[9] 高小梅,李兆麟,贾雪,等. 人工模拟降雨装置的研制与应用[J]. 辐射防护, 2000, 20(1- 2): 86- 90.

[10] 贾天会,黄毅,曹忠杰. 辽南土石质山区坡耕地水土流失试验研究[J]. 中国水土保持, 2001, (3): 23- 24.

[11] 叶翠玲,许兆义,杨成永. 秦沈客运专线建设过程中的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 9- 13.

[12] 刘纪根,雷延武. 坡耕地施加 PAM 对土壤抗蚀冲蚀能力影响试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 59- 62.

[13] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰. 黄土丘陵区草灌植被的减沙效应及其特征[J]. 草地学报, 2003, 11(1): 23- 26.

[14] 沈波,郑南翔,田伟平. 路基压实黄土坡面降雨冲蚀试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(4): 64- 67.

[15] 赵西宁,王万忠,吴发启. 不同耕作管理措施对坡耕地降雨入渗的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2004, 32(2): 69- 72.

[16] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 12- 18.