

人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析

赵玉丽, 牛健植

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要:由于试验的需要和人工模拟降雨的优点,越来越多的研究者采用人工模拟降雨。但在大量的试验中,人工模拟降雨试验的降雨特性与天然降雨特性之间联系不够紧密,对应特性之间存在差异。除了人工模拟降雨特性与天然降雨特性的不统一性外,人工模拟降雨试验中还存在一些自然与非自然因素导致的问题,在关注并逐一克服这些问题的同时,将人工模拟降雨和高科技技术,如 GPRS 等结合起来,应用于更广阔的领域。

关键词:人工模拟降雨; 降雨特性; 天然降雨; 降雨强度

中图分类号:S423⁺.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)04-0278-06

Analysis of Properties and Problems about Artificial Rainfall Simulation Tests

ZHAO Yu-li, NIU Jian-zhi

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the need of the experiments and the advantages of artificial rainfall simulation, an increasing number of researchers use artificial rainfall simulation to carry out specific study. However, in a large number of tests, properties of simulated rainfall are different from corresponding properties of ordinary natural rainfall. Besides, there are some problems caused by natural or non-natural factors in the artificial rainfall simulation tests. Combined with high-tech technology such as GPRS, artificial rainfall simulation test should be used in wider areas while paying attention to and working out those problems.

Key words: artificial rainfall simulation; rainfall properties; natural rain; rainfall intensity

人工模拟降雨作为可调控降雨试验条件的一个有效手段,被广泛应用于水土保持研究的领域,同时,也被应用于农业和林业等学科方面^[1]。在水土保持研究中,作为全球最重要的环境问题之一,土壤侵蚀是相关领域内众多学者的关注内容和研究课题。鉴于人工模拟降雨方法能够在较短时间内获得自然降雨条件下无法获取的试验数据,而成为学者们进行土壤侵蚀试验的一个主要研究办法。通过野外与室内人工模拟降雨,能够更快的了解不同地区不同土壤类型下的产流侵蚀特征,为当地的水土保持措施和侵蚀预报等提供理论依据。例如史银志等^[2]采用室内人工模拟降雨的方法揭示了新疆伊宁市北山坡土壤侵蚀特性,探索了当地坡面降雨的侵蚀机理并为其后来的侵蚀预报提供了依据。此外,谢如林^[3]、马琨^[4]、杨聪^[5]以及丁文荣^[6]等也采用人工模拟降雨器对不同地区土壤的产流和侵蚀规律进行过研究,促进了研究

区的水土保持规划和治理的发展。利用人工模拟降雨,也可研究不同植被格局下的产流产沙特征^[7]以及不同植物的水土保持能力^[8],证实并提高了植被格局的优化配置方针在水土保持中的作用,也为不同地类下具有良好水土保持效益的物种的选择提供了科学依据。人工模拟降雨也被运用于研究降雨条件下养分运移规律和土壤颗粒的时空变化特征,包括不同降雨条件下荒地坡面、不同植被格局的营养元素和土壤颗粒变化以及使用土壤改良剂下的养分变化状况等,这些研究为水土流失地区的水土保持措施配置以及养分调控和土壤改良等提供了大量理论根据^[9-13]。除此之外,在研究土壤入渗、降雨特性(主要是降雨强度)与产流产沙的关系、侵蚀的预报和模型的探讨以及土壤可蚀性研究(包括不同因子如坡度、坡长和土壤前期含水量等对可蚀性的影响)等方面,也用到了人工模拟降雨^[14-21]。所有这些研究,使人们对机理和

收稿日期:2012-02-15

修回日期:2012-04-16

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005);国家“十二五”科技支撑项目“三北地区水源涵养林体系构建技术与示范”(2011BAD38B05);国家自然科学基金(30800888)

作者简介:赵玉丽(1988—),女,陕西榆林人,在读硕士,主要研究方向:林业生态工程。E-mail:fezhaoyuli@163.com

通信作者:牛健植(1974—),女,吉林四平人,博士,副教授,主要研究方向:景观生态学、森林水文学。E-mail:nexk@bjfu.edu.cn

过程更加了解,更有效的保护和利用自然资源,同时促进了水土保持科学的进步。

人工模拟降雨在农业方面的应用也相对较多。农业是人类“母亲产业”,是人类赖以生存的根本,而农业中的水土流失问题,尤其是农业用地中坡耕地的问题,却日益困扰着我们。刘莉丽等^[22]对坡耕地土壤流失规律研究表明,坡度和耕作措施相同时,雨强与土壤侵蚀模数之间呈指数函数关系,耕作措施相同、雨强相近时,土壤侵蚀模数与坡度之间呈幂函数关系。贾天会^[23]对辽南土石质山区坡耕地的试验研究表明,降雨侵蚀力(R)、地面坡度(S)、雨前土壤含水量(W)和作物盖度(C)对坡耕地径流量影响大小依次是 R, W, S, C ,对土壤冲刷量影响大小依次是 R, W, C, S 。于东升等^[24]对亚热带坡耕地沟蚀和沟间侵蚀的研究表明,在无外来地表径流影响下,土壤沟蚀量与沟间侵蚀量相差不大,且土壤沟蚀率与土壤自身特性和外来径流量大小关系密切。此外,人工模拟降雨还被应用到不同耕作措施与方法下的土壤入渗与产流侵蚀规律研究以及农业施肥对营养元素的影响等方面^[25-30]。

利用人工模拟降雨比天然降雨能更快捷有效地获取试验数据。然而,对以往人工模拟降雨文献的阅读表明,人工模拟降雨与天然降雨之间的联系不够紧密,或者不能很好地模拟天然降雨的物理特性,与天然降雨之间缺乏完全的对应,这使得人们开始质疑由人工模拟降雨所得数据的有效性和结论的可靠性^[31]。

本文论述了模拟降雨特性与天然降雨特性之间的差异,并指出目前人工模拟降雨试验中存在的一些问题以及未来人工模拟降雨试验的发展。

1 人工降雨试验设备的建设和发展

由于每年天然降雨产流次数的有局限性,国外十分重视人工模拟试验设备及试验大厅建设。美国从20世纪60年代开始就十分重视人工模拟降雨研究,开发出了多种人工模拟降雨设备,并于70年代末在美国国家实验室(普渡大学)建立了人工模拟试验大厅。模拟降雨大厅的建立,大大促进了土壤侵蚀基本理论的研究,为后来新一代土壤侵蚀预报模型的建设作出了重要贡献。在亚洲,日本也于20世纪70年代在筑波国家防灾中心建立了亚洲最大的人工降雨模拟大厅,主要用于滑坡泥石流机理研究,为其防灾事业发挥了重要作用。20世纪90年代初,中国科学院水土保持研究所在吸收了日本筑波国家防灾中心经验的基础上,建立了人工降雨模拟大厅,用于土壤侵

蚀的和水土保持科学定量化研究。近年来,我国引进和研制了多种类型的人工降雨装置应用于室内与野外试验^[32]。而基于径流小区试验发展起来的人工模拟降雨试验,克服了固定小区依赖于天然降雨的弊病,能在短时期内进行多因子多次观测试验,积累较多所需资料^[33]。另外,Gary^[34]等人认为基于试验室尺度的研究比基于坡面尺度的研究更经济、便捷、可控。随着人类社会的进步与发展,各种环境与资源问题也不断涌现并日益严重。为了更好的保护与改善人们的生存环境,迫切需要进一步详细了解这些问题的根源与发生机理。人工模拟降雨机不受时间和空间的限制,能尽可能的避免各种自然因素的影响,较好的模拟天然降雨,缩短试验周期的优点显得尤为突出。

综上所述,以人工模拟降雨为试验手段是一些领域特别是水土保持领域不可或缺的一个重要研究方法^[35]。

2 人工模拟降雨的降雨特性

2.1 降雨强度

降雨量与降雨强度作为天然降雨的重要特征之一,是许多人工模拟降雨试验研究的单一指标,也是最基本的一种模拟降雨^[36]。

模拟降雨,即是模拟天然降雨,所以在一些研究中,降雨强度的选择是根据已有天然降雨的数据资料进行选取的。如徐力刚等^[37]在研究不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程和淋失量的影响中,其试验中降雨强度的选择是根据对抚仙湖区域多年来的短时降雨强度进行概率频度分布分析,以此为依据,确定了代表当地常见的短历时降雨的四种不同强度为试验降雨强度。

对已发表文献进行总结,发现我国人工模拟降雨的雨强更多取决于所用模拟降雨装置。而模拟降雨装置的降雨强度主要是通过调节流量和控制压力来调控的^[38]。孙飞达等^[14]在研究黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响中表明,其采用的降雨强度是将降雨器的压力控制在60 kPa并控制降雨器的摆动速度来调节降雨量,观测30 min后计算求得平均降雨强度。张光辉等^[39]认为,按照降雨形成的方式,人工模拟降雨机可分为喷嘴式和针管式。一般以喷头为雨滴发生器的降雨装置的雨强范围在30~150 mm/h,针管式模拟降雨装置的雨强范围一般在2~100 mm/h。研究者一般在降雨装置可提供的雨强范围内选择一个雨强,作为模拟降雨的雨强参数。

另外,由于土壤、地形等的影响,研究者而为了得

到可测数据从而研究水文过程和土壤侵蚀机理等。有意选择大雨强目的是如刘刚等^[40]在坡度与降雨强度对植物路路面侵蚀动力参数影响的研究中,在对比分析不同坡度的影响时,采用的降雨强度为 120 mm/h。因其采用的供试土壤来自黄土高原北部的陕西省延安地区,所以我们以延安地区的降雨强度为例,据陕西气象台 7 月份的报道,延安市某几个县城出现了 24 h 雨量超过 100 mm 的大暴雨,雨量 137.1 mm,则其平均降雨强度才达 5.71 mm/h,相比较而言,采用的试验降雨强度远远大于实际降雨强度。Harden^[41]也有意选择大于土壤入渗率的模拟降雨强度,为了使地表产生径流。

2.2 雨滴特性

雨滴特性的相似性是人工模拟降雨中的一个主要内容,在土壤侵蚀方面的研究中,雨滴大小、雨滴中数分布、雨滴终速和雨滴动能,是主要的关注内容。目前大多数研究者,都是以这四个降雨特性来比较和评价人工模拟降雨^[36,38,42]。雨滴到达终速所需的高度随着雨滴粒径的增大而增大,Laws^[43]认为当降雨高度达到 20 m 时,所有雨滴落地时都能达到终速。据此,降雨高度都接近 20 m 的中国科学院水利部水土保持研究所和河海大学的模拟降雨大厅都可使所有的雨滴达到终速^[44-45]。但是,在野外试验条件下,基于安全和试验仪器的限制和成本等因素,降雨高度几乎没有超出 10 m 的试验,所以很多情况下,雨滴击溅地表时并未达到终速。另外,除以上四个降雨特征除外,降雨的其他属性被普遍忽略了,如 Hosking^[46]提出的“雨滴下降率”。Foley^[47]在室内土壤方面的试验中发现,雨滴下降率会对渗透速率和地表的入渗能力产生影响,在一些情况下这个参数比降雨强度具有更强的解释力。

2.3 降雨历时和降雨量

降雨历时和降雨量对入渗、坡面水土流失以及土壤中养分的迁移等过程都有重要作用。当降雨强度保持不变时,降雨量随着降雨历时的延长而增大^[2]。但是作为重要的降雨特征之一,关于降雨历时的研究却不多^[48]。国内大多数的人工模拟降雨试验中不考虑降雨历时的影响,选择了固定的降雨历时。如耿晓东等^[49]在降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响中将降雨历时均设定为 60 min,张会茹等^[50]在不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响也选择了 60 min 的降雨历时。另外在室内人工模拟降雨试验中,许多试验采用了更短的降雨历时,如徐震等^[51]在雨滴击溅对坡面径流输沙的影响中降雨时间为 20 min。这与天然降雨的很多长

历时降雨明显不同,不同降雨历时和降雨量下的各种水文过程以及侵蚀机理也不相同。

2.4 雨型

雨强参数的描述不仅包括其均值,还包括雨强随时间和空间的变化特征,雨强的时空变化特征可用雨型表示,吴彰春^[52]对坡面汇流的试验研究表明,雨型对小流域的洪峰流量和流量过程都有显著的影响。但是国内的人工模拟降雨中大部分采用的是近似均匀降雨,即以一个均值来描述降雨强度,雨型研究的并不多。早在 1984 年,杨丕庚等^[53]提到设计雨型这一说法,但是其原则上也是按降雨均匀为标准,划分降雨时段,并计算各时段的平均降雨强度。刘素媛^[54]认为不同雨型对雨滴特性影响所造成的差异表明,降雨因子对土壤侵蚀影响较为复杂,除了雨强、雨滴动能对侵蚀的影响,雨型对侵蚀的影响也不可忽视。王答相^[55]对神府东胜矿区煤田开发新增水土流失试验研究结论和吴彰春的结论相似,表明不同雨型影响净雨量和洪峰流量的大小。

2.5 均匀度

降雨的均匀性是人工模拟降雨的另一个重要指标,也是研制人工模拟降雨装置的重要依据,更是一种衡量人工模拟降雨装置能否被采用与否的重要标准。国内外一般用降雨量等值线图和均匀系数来表示降雨分布的均匀程度^[36]。在野外试验中,更多的是采用测量降雨均匀系数的方法来确定模拟降雨装置的雨滴均匀分散程度和坡面的最佳受雨面积,以此来选择降雨装置和确定设计试验小区尺寸。目前我国模拟降雨中对于降雨均匀度都比较重视而且均匀度指标一般都大于 0.8^[38]。

2.6 关于降雨特性相似性问题的建议

虽然人工模拟降雨与天然降雨的降雨特性存在一定的差异,不能完全统一,但人工模拟降雨这一方法在林冠截留^[56-57]、入渗^[58-59]、降水和地表土壤的关系^[51,60]等研究方面的广泛应用引起了人们的广泛关注。趋于极端天气状况^[61]下降雨对土壤侵蚀、营养元素流失和地表径流等影响的研究促进了相关学科的发展,也为这些可能引起破坏或者灾害性事件发生的地区提供了宝贵的防护技术方面的理论支撑。但现实中更为多见的一般性降雨事件,需要研究者的关注和探讨。为此,基于上述人工模拟降雨特性与天然降雨特性存在的差异提出两点建议:首先,在进行人工模拟降雨试验之前,需要收集大量试验地相关的较为详细的天然降雨资料。而这一问题解决的基础是相关气象部门对水文资料更为详细的调查和记录,如增加专门提供科研数据的水文实验站及其所涉及的

调查内容。其次,是改进人工模拟降雨装置。一是尽量实现装置系统操作的自动化,避免人工操作引起的误差。二是降雨装置设计时涉及和考虑更多的降雨参数,更真实地模拟天然降雨。如增加场降雨内雨型的变化,不止是均匀降雨。实现降雨强度的连续性变化,而不仅是一些档位间的跳动^[39]。

3 人工模拟降雨试验中的可能问题及解决途径

人工降雨试验中的可能问题概括起来可分为自然因素导致的问题和非自然因素导致的问题。

3.1 自然因素导致的问题

陈文亮^[62]根据试验用途,将人工模拟降雨装置分为室内人工模拟降雨装置和野外人工模拟降雨装置。相对于野外人工模拟降雨,室内人工模拟降雨在控制湿度和温度,防风、防雨等自然因素导致的问题方面占很大优势,但是对于不同的土壤、地形、地貌、植被、土地利用方式、坡度等方面的研究,却不能直接进行,需要先模拟自然条件下的这些因子,然后进行试验。野外人工模拟降雨恰恰相反,虽然有现成的不同试验条件,但是对于自然因素尤其是气候方面的干扰,却是一个重要问题。主要表现在气候条件所导致的试验被迫中断、推迟或者是试验数据的不准确性,其中尤数风的干扰最为明显,为了解决这个问题,肖洋^[63]和王玉霞^[13]都选择了早晨晴朗无风的天气进行试验,杨丕庚^[53]和陈文亮^[62]选择在试验地设置防风帐篷。另外,试验时的突发天然降雨也会导致试验中断或者延迟,尤其当试验结论和土壤含水量有关系的时候。为此,王玉霞等^[13]遇到自然降雨时及时遮盖测定小区。

3.2 非自然因素导致的问题

非自然因素导致的问题有试验仪器方面的问题和人为测试方法方面的问题。

试验仪器。在野外人工模拟降雨中,除了考虑试验所用仪器的便携性和易操作性外,水电的供给是试验能否开展的一个决定性问题。人工模拟降雨装置的安装高度和降雨的雨滴特性有关系,如前所述,高度越大,雨滴越接近于天然降雨,然而,出于安全和操作的可行性,尤其是野外试验条件下,研究者一般根据相应的试验内容选择一个合理的安装高度^[64]。人工模拟降雨中供水压力的控制是试验中的另一个重要问题,由于输水管道材料的选择,使得同一压力下试验的重复性较差,所以试验中输水管道最好选择不易变形的材料。

人为测试方法。在测试方法的选择上,必须根据

所用的仪器来选择准确而且合理的测定各个参数的方法。

4 未来进行人工模拟降雨试验的展望

综合国内外人工模拟降雨的研究,大量野外和室内研究主要集中在对比单个降雨特性、不同树种、同一树种不同密度、不同坡度、不同坡长、不同土地利用方式下的产流侵蚀量,随着科学技术的发展和研究的不断深入,对于这些因素的综合性研究以及这些因子影响水土流失的过程和机理将进一步加强。

除了野外试验和室内模拟试验方面的应用,人工模拟降雨方法的应用还可普及到一些微型试验。如土壤水分运移的研究,了解不同土壤结构下水分的运移状况并为人类的生产生活和生态安全提供一些科学依据(因为降水中所含的一些元素可能会污染水体)^[65]。植被根系是连接土壤水和植被的一个重要部分,若将人工模拟降雨应用于降水特性—植被根系—土壤水—降水有效性这一系列的研究,将促进降水与植物群落关系的研究。人工模拟降雨也是研究枯落物在水文过程中的作用的一个有效方法。

另外,赵志进等^[66]在1989年提出了对人工模拟降雨试验中的径流泥沙进行遥测的设想,杨敏^[67]于2009年对基于GPRS的人工模拟降雨远程监控系统进行了研究,虽然实现了赵志进先生提出的人工模拟降雨的遥测设想,但主要针对的是模拟降雨中流量的测量和传输,对于温度、湿度、压力、含沙量以及降雨机是否正常运行等有待进一步研究,实现人工模拟降雨的全面遥测,在节省时间和人力的同时使试验过程更科技化。

人工模拟降雨在农业方面的应用还不是很广泛,期待通过人工模拟降雨试验,促进生态农业和节水农业等综合性学科的发展,从而更好的开发利用自然资源,实现农业稳定和可持续性的发展。

5 结语

总结前面的论述可以看出,人工模拟降雨在强调一部分降雨特性的时候忽略了其他的一些重要降雨特性,或者是所考虑的降雨特性也与对应的天然降雨特性之间存在一些差异,这会使得到的实际的水文过程和侵蚀机理等的理解和掌握将产生一定的偏差。因此,在克服模拟降雨试验中的自然与非自然因素引起的各种问题的同时,模拟降雨应考虑更多的降雨特性和模拟更为接近天然降雨的降雨过程。此外,为了使模拟降雨有一个原版可参照,从而更真实地模拟天然降雨,分析更多情况下的水土流失特征,应全面详细

统一地记录各地降雨资料,为后面的研究工作提供方便,做到降雨资料整编的及时性、高质量、统一性和稳定性^[68]。将人工模拟降雨与高科技结合是提高目前相关领域研究水平的一个出口。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 史银志,雷晓云.基于人工模拟降雨的土壤侵蚀特性试验研究[J].石河子大学学报:自然科学版,2008,26(4):487-490.
- [3] 谢如林,杨补勤.采用人工模拟降雨器对湖北省主要土类侵蚀性的研究[J].华中农业大学学报,1991,10(4):367-373.
- [4] 马琨,陈欣,王兆骞.模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J].宁夏农学院学报,2004,25(1):1-4.
- [5] 杨聪,于静洁,刘昌明,等.华北山区坡地产流规律试验研究[J].地理学报,2005,60(6):1021-1028.
- [6] 丁文荣,王洁,周跃.基于人工模拟降雨的垂直侵蚀研究[J].水土保持研究,2006,13(4):187-189.
- [7] 李强,李占斌,尤洋.植被格局对坡面产流产沙影响的试验研究[J].水资源与水工程学报,2007,18(5):31-34.
- [8] 孟广涛,方向京,李贵.人工模拟降雨条件下3种多年生牧草水土保持能力分析[J].水土保持研究,2010,17(2):49-53.
- [9] 陈晓燕,周继,魏朝富,等.人工模拟降雨条件下PAM对紫色土养分流失的影响[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(4):548-560.
- [10] 周继.人工模拟降雨条件下土壤颗粒变化及养分流失的研究[D].重庆:西南大学,2009.
- [11] 陈晓燕,牛青霞,周继,等.人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J].水土保持学报,2010,24(5):163-168.
- [12] 高扬,朱波,汪涛,等.人工模拟降雨条件下紫色土地生物可利用磷的输出[J].中国环境科学,2008,28(6):542-547.
- [13] 王玉霞.茵陈蒿群落分布格局对坡面产流产沙、养分流失及微地表变化的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [14] 孙飞达,王立,龙瑞军,等.黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2007,14(2):16-18.
- [15] 王月玲,王思成,马璠,等.宁南山区不同降雨强度下坡地的产流产沙特征分析[J].宁夏农林科技,2011,52(8):64-67.
- [16] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [17] 吕喜玺,史学正,于东升.用人工模拟降雨研究南方低丘土壤的渗透[J].水土保持学报,1995,9(3):1-8.
- [18] 张兵.紫色丘陵区土壤可蚀性模拟研究[D].重庆:西南大学,2009.
- [19] 史学正,于东升,吕喜玺.用人工模拟降雨仪研究我国亚热带土壤的可蚀性[J].水土保持学报,1995,9(3):38-42.
- [20] 刘立,邢廷炎.中国亚热带土壤不同前期含水量对可蚀性K值的影响[J].土壤与环境,2002,11(1):66-69.
- [21] 刘和平.坡长对土壤可蚀性K值测定的影响[D].北京:北京师范大学,2008.
- [22] 刘莉丽,张建军,聂小妮,等.坡耕地土壤流失规律研究[J].西北林学院学报,2005,20(4):101-103.
- [23] 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):23,36.
- [24] 于东升,史学正,王宁.用人工模拟降雨研究亚热带坡耕地土壤的沟蚀和沟间侵蚀[J].土壤学报,2001,38(2):160-166.
- [25] 王晓燕,高焕文,杜兵.用人工模拟降雨研究保护性耕作下的地表径流与水分入渗[J].水土保持通报,2000,20(3):23-25.
- [26] 刘柳松.秸秆覆盖对干态和湿态土壤产流过程的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):6-9,81.
- [27] 牛伊宁.覆盖和耕作对黄土高原冬小麦土壤入渗特性的影响[J].山地学报,2006,24(1):13-18.
- [28] 王勇强,王玉宽,傅斌,等.不同耕作方式对紫色土侵蚀的影响[J].水土保持研究,2007,14(3):333-335.
- [29] 王涛,张维理,张怀志.滇池流域人工模拟降雨条件下农田施用有机肥对磷素流失的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1092-1097.
- [30] 姚军,王亮,何丙辉.人工模拟降雨不同施肥方式下紫色土养分流失研究[J].西南大学学报:自然科学版,2010,32(11):83-88.
- [31] Agassi M, Bradford J M. Methodologies for interrill soil erosion studies[J]. Soil and Tillage Research, 1999,49(4):277-287.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] So H B, Sheridan G J, Horn C P, et al. Predicting hillslope scale erodibility and erosion on disturbed landscapes from laboratory scale measurements[C]// Stott D E, Mohtar R H, Steinhardt G C. Sustaining the Global Farm. The 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University, 2001: 1053-1058.
- [35] 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.

- [36] 陈文亮,王占礼. 人工模拟降雨特性的试验研究[J]. 水土保持通报,1991,11(2):55-62.
- [37] 徐力刚,张奇,徐进,等. 不同降雨强度对营养盐垂向迁移过程和淋失量的影响[J]. 土壤学报,2008,45(3):437-444.
- [38] 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.
- [39] 张光辉,刘宝元,李平康,等. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与降雨特性. I:工作原理[J]. 水土保持通报,2007,27(6):56-60.
- [40] 刘刚,郑世清,田风霞,等. 坡度与降雨强度对植物路面侵蚀动力参数的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(4):44-49.
- [41] Harden C P, Scruggs P D. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments[J]. Geomorphology,2003,55(1/4):5-24.
- [42] 刘素媛. SB-YZCP 人工模拟降雨装置特性分析[J]. 中国水土保持,1999(5):18-20.
- [43] Laws J O. Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops[J]. Transactions, American Geophysical Union,1941,22:709-720.
- [44] 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.
- [45] 刘震,郝振纯. 人工模拟降雨系统总体设计[J]. 水利水电技术,1998,8(29):1-4.
- [46] Hosking J G, Stow C D. The arrival rate of raindrops at the ground[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology,1987,26(4):433-442.
- [47] Foley J L, Silburn D M. Hydraulic properties of rain impact surface seals on three clay soils—influence of raindrop impact frequency and rainfall intensity during steady state[J]. Australian Journal of Soil Research,2002,40(7):1069-1083.
- [48] 陆宝宏,汤有光. 识别合适的降雨强度—历时—频率模型的方法[J]. 河南大学学报,2001,29(4):109-115.
- [49] 耿晓东,郑粉莉,刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. 泥沙研究,2010(6):48-53.
- [50] 张会茹,郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [51] 徐震,高建恩,赵春红,等. 雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(6):20-23.
- [52] 吴彰春,岑国平,安智敏. 坡面汇流的试验研究[J]. 水利学报,1995(7):84-89.
- [53] 杨丕庚,赵志进,陆洪斌,等. 人工模拟降雨方法及其初步应用[J]. 中国水土保持,1984(10):20-24,63.
- [54] 刘素媛,聂振刚. 辽西低山丘陵半干旱地区天然降雨雨滴特性研究初报[J]. 中国水土保持,1988(2):15-17,14.
- [55] 王答相. 神府东胜矿区煤田开发新增水土流失试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2004.
- [56] 王安志,刘建梅,裴铁璠,等. 云杉截留降雨实验与模型[J]. 北京林业大学学报,2005,27(2):30-35.
- [57] 卫三平,王力,吴发启. 黄土丘陵沟壑区刺槐林冠截留模拟[J]. 林业科学,2008,44(1):26-33.
- [58] 刘承,王玉宽,傅斌,等. 紫色土不同土地利用方式下降雨入渗试验研究[J]. 水土保持研究,2009,16(3):20-23.
- [59] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报,2001,6(6):42-47.
- [60] Yasuhiro O, Akira S. Experimental studies on rain splash erosion of forest soils after clearing in Okinawa using an artificial rainfall apparatus[J]. Journal of Forest Research,2004,9(2):101-109.
- [61] David D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting[J]. Hydrological Process,2008,22(22):4415-4435.
- [62] 陈文亮. 组合式野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持通报,1984,4(4):43-48.
- [63] 肖洋. 北京山区森林植被对非点源污染的生态调控机理研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.
- [64] 薛燕妮,徐向舟,王冉冉,等. 人工模拟降雨的能量相似及其实现[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):102-105.
- [65] 牛健植,余新晓,张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统土壤优先流研究初探[J]. 北京林业大学学报,2008,30(S2):246-254.
- [66] 赵志进,李桂英. 人工模拟降雨机具和方法的发展研究与展望[J]. 中国水土保持,1989(5):30-33,7.
- [67] 杨敏. 基于 GPRS 的人工模拟降雨远程监控系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [68] 王敏,谭向诚. 北京城市暴雨和雨型的研究[J]. 水文,1994(3):2-6,64.