

可移动水土流失实验室系统的原理及特点

师哲, 赵健, 张平仓

(长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 可移动水土流失实验系统使固定的野外径流小区坡面侵蚀观测转变为车载流动试验观测。实践结果表明,该系统可实时对不同坡度的小区进行人工降雨模拟实验,分析侵蚀土壤理化性质和坡面侵蚀过程,极大地提高了水土流失观测的速度和效率。系统中液压自动升降坡面侵蚀土槽可根据试验要求稳定变化,且坡度可在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间任意调整,加快了数据采集速度,缩短了试验周期,数据采集更加方便。针对长江流域土壤侵蚀特点对传统试验土槽做了改进,增加了壤中流收集装置,使得坡面侵蚀试验装置更趋合理。人工模拟降雨试验喷头模拟的雨强范围也明显增加,可在 20~170 mm/h 之间任意调整。

关键词: 水土流失; 可移动实验室系统; 降雨模拟; 侵蚀规律; 侵蚀模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)02-0207-05

中图分类号: P481, S157.1

Working Principle and Basic Characteristics of Removable Laboratory System for Soil and Water Loss Measurement

SHI Zhe, ZHAO Jian, ZHANG Ping-cang

(Changjiang River Scientific Research Institute, Department of Soil and Water Conservation, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: A removable laboratory system of soil and water loss (RLSSWL) is proposed and developed. RLSSWL can substitute removable experimentation laboratory (vehicular) for the field and immovable soil on runoff plot. By adopting artificial rainfall simulation to runoff plot of different gradients, RLSSWL may be used to analyze soil physicochemical properties and soil erosion processes on hillslope and thus greatly improves the efficiency of soil loss observation. The erosion soil-bin has a hydraulic automatic rising device, as key part of RLSSWL, and soil-bin gradient can be adjusted from 0° to 30° according to different experiment requirements. Using RLSSWL may accelerate data collection, shorten experiment period, and make data collection more convenient. Based on the soil erosion characteristics in Yangtze River, an interflow collection device is added in RLSSWL. By improving the soil-bin, it becomes more practicable and rational to soil erosion experiment on hillslope. Meanwhile, rainfall intensity of artificial rainfall simulation has a wider range, which can be adjusted between 20 and 170 mm/h.

Keywords: soil and water loss; removable laboratory system; simulated rainfall; soil erosion mechanism; soil erosion model

我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,全国因水土流失每年损失约 $6.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 耕地,平均流失土壤达 $5.00 \times 10^9 \text{ t}$,已成为头号的生态环境问题^[1]。水蚀是最主要的水土流失的侵蚀类型,包括面蚀、沟蚀、溶蚀及河流侵蚀等形式^[2-3]。尤以面蚀最普遍,广泛分布在坡耕地、荒山荒坡及疏幼林地,坡面土壤侵蚀实验和观测是水土保持理论研究及治理的基础内容^[4]。随着经济社会的快速发展,开发建设项目引起的水土流失逐渐增多^[5-8],水土流失预测成为开

发建设项目水土保持工作中的重点内容。科学、有效地防治水土流失,客观评价水土流失治理效益,必须建立在对土壤侵蚀规律有深刻认识和解释的基础上。径流和侵蚀的发生、发展和演变过程,是自然因素和人为因素综合影响的结果,水土保持基础研究和水土流失区的动态监测必须进行大量的野外实验和观测研究。

土壤侵蚀实验技术主要指研究观测侵蚀过程、土壤侵蚀定量评价的技术和方法。包括 3 个方面:土壤

收稿日期: 2009-07-22

修回日期: 2009-11-20

资助项目: 国家重点基础研究(973)发展计划项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB40720301); 国家自然科学基金项目(10672125)

作者简介: 师哲(1964—),男(汉族),甘肃省会宁县人,高级工程师,主要从事泥沙及水土保持研究。E-mail: shizhe@mail@126.com。

侵蚀野外定位观测实验技术,土壤侵蚀模拟实验技术和土壤侵蚀的专项试验测定方法^[9-11]。就研究现状来看,对于区域尺度水土流失宏观信息的获取,无论是目前采用的定期遥感普查方法还是利用土壤流失方程(USLE),均存在着明显的缺陷而难以在大区域内广泛采用。传统的水土流失预测方法是在野外建立不同坡度、不同植被覆盖条件下的径流小区(定位观测),利用天然降雨对坡面土壤侵蚀过程进行观测,此种方法为水土流失科学研究提供了大量的科学数据。然而,利用天然降雨的观测方法不能快速获取地表土壤侵蚀过程数据,使得研究周期长、试验数据可靠度差、投入高,限制了土壤侵蚀学科的快速发展,难以满足水土流失基础研究和治理的需要^[3,12]。为了快速地研究土壤侵蚀过程,缩短研究周期,需在较短时期内模拟天然降雨试验。目前国内外基本采用人工模拟自然降雨,主要研究人工降雨与天然降雨的特征相似,以便控制降雨量、强度、水土保持措施、坡度、坡长及土壤物理化学性质等因素,研究降雨对土壤侵蚀的影响。美国、日本等国于 20 世纪开始研究如何将野外开展径流小区的试验移入实验室内,消除由于自然天气条件限制而不能开展试验的问题,研制了多种形式的人工模拟降雨装置。美国在 20 世纪 30 年代开展野外模拟人工降雨试验,50 年代后期有较快发展。我国自 20 世纪 60 年代开始人工降雨装置的研制,牟金泽等研制了由不同直径出流孔板为喷头的侧喷式人工降雨初型装置。陈文亮等于 20 世纪 80 年代初正式推出了适于我国的侧喷式野外人工降雨装置。中国科学院地理研究所从加拿大引进的下喷式模拟降雨装置,在野外进行了大量不同因素影响下侵蚀过程的研究^[13-16]。通过测定降雨强度、土壤侵蚀量,研究各种雨型、下垫面和不同地表处理条件下的土壤侵蚀规律(土壤侵蚀模拟实验),从而确定了水土流失量,建立侵蚀模型,实现了对水土流失区的动态监测。但野外作业的模拟降雨器需要动力输出和大型运输设备,不便携带,移动性差,组合、装卸非常不便。降雨强度等指标需要在现场率定。实验操作和试验成果获取及后期处理周期长、工作量大,因此使用受到较大限制^[17]。为此需要一种快速现场降雨侵蚀实验及结果测量综合实验平台装置,它可以使各个不同实验现场(原状土、扰动土)水土保持科学实验达到准确、快速、方便、全自动一体化。

针对这些问题,2006 年长江科学院以“可移动水土流失实验系统项目”申请《中央级科学事业单位购

置专项》获批,2009 年该系统验收并已在水土流失基础研究和监测中得到应用^[18]。项目实施以坡面水土流失过程实验数据采集为切入点,建设现代化的水土流失过程实验采集系统,将人工模拟降雨装置、可变坡侵蚀、高压供水装置、土壤理化性质测试装置等一体化,真正实现了移动、模拟实验一体化。

可移动水土流失实验系统变固定的野外径流小区坡面侵蚀观测为车载流动试验,可随时对原状原位不同土壤、不同坡度进行人工降雨模拟实验,分析侵蚀土壤理化性质和坡面侵蚀过程,极大地提高了水土流失观测的速度和效率,节省大量人力和物力。对区域水土流失基本情况,特别是对开发建设项目造成的扰动土的水土流失数据的快速获取具有重大意义。

1 可移动水土流失实验室系统工作原理及构成

1.1 可移动水土流失实验系统工作原理

为了克服现有各种野外水土流失试验方法和实验设备移动性差,装配控制复杂,试验费时、费力的缺点,本系统提供一种车载的、可移动并使用自带电源装置、自带供水和循环系统、全自动调控摇摆下喷式降雨器和便携式水土流失自动监测系统。采用将载重卡车经过改装,使其成为移动水土流失实验室的自移动动力系统,支持机械的液压动力及现场电源的自由选择,提供降雨器及控制、仪器设备的电力保障,从而方便移动于各种不同野外试验场地,全天候保证系统能够实现在不同地形地貌条件下试验研究的要求。在试验期间,由压力水泵、水箱以及相配套的供水系统给降雨器供水,降雨器分为车载固定式和移动式,分别用于扰动土和不同类型土壤试验及野外原状土试验;通过液压油缸实现下喷式降雨器(固定式)降雨(雨滴)高度调节,通过调节给水管压力、喷头摆幅频率以及不同喷头孔径实现降雨雨强调节(雨强可事先率定),并且使余水通过回水系统返回水箱再利用;为保证野外有足够的实验用水,系统考虑了水泵抽取可利用水源(山塘、溪沟、江河)水到车载水箱,根据雨强大小和试验要求水箱有外排阀门控制;可变坡侵蚀槽位于降雨器下方,可以自动测控坡度变化,0°~30°连续坡度变换由液压油缸控制,坡度可变化到稳定的指定值;固定式自水平及液压升降系统采用 3 级液压缸升降,液压变坡钢槽坡度变化时,降雨器与土槽坡面始终自动保持平行,以使坡底、坡顶与降雨器喷头的距离均保持 2.4 m 高度;系统安装测控实验间,实现对

降雨高度、雨强以及变坡钢槽进行调控,加上其它试验所需的辅助设施以及配置的观测仪器(土壤理化分析仪器、水土流失自动监测系统),可对观测测量结果进行同步实时测量、存储,满足了试验研究的要求。

1.2 可移动水土流失实验系统构成

可移动水土流失系统主要由5个部分组成(图1),包括动力总成、可变坡槽、试验箱、降雨系统、水土流失监测系统。

(1) 动力总成。动力设备配置有3个来源,包括牵引车、发电机、外接电源。发电机为实验系统提供动力,带稳压系统,保证实验动力的稳定性。外接电源在可提供电源的情况下,满足实验动力要求。实验电源可在发电机与外接电源之间转换。

(2) 可变坡槽。可变坡槽为整体钢结构,安全可靠。坡槽通过一组液压油缸实现 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的倾斜。降雨器垂直固定在钢槽两侧的楼梯上,根据机构的平行

四边形原理,自旋楼梯随坡槽的升降能与地面始终保持平行(即降雨器垂直)。

(3) 降雨系统。系统由模拟降雨器、供回水系统、水箱组成。模拟降雨器设有3组下喷摇摆式喷头(喷嘴可更换3个型号),有自动、手动控制模式,可自动调节雨量大小。其有效降雨面积 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$,降雨高度 2.4 m ,降雨强度连续变化范围 $20\sim 170\text{ mm/h}$,降雨均匀度系数大于 0.8 ,雨滴大小调控范围为 $0.7\sim 3.8\text{ mm}$ 。

(4) 供回水系统。在试验期间,由水泵、水箱以及相配套的供回水系统完成降雨器供水。采用管道压力控制器调节,试验前率定降雨喷头。在喷头附近设有回水收集器,用于调节喷水面积,模拟自然降雨均匀度及回收余水。水箱为不锈钢制作,有储存、调节、外接水源功能,可在无水源的场地工作。配备2台水泵,1台离心泵为降雨器供水,1台潜水泵利用野外水源给水箱供水。

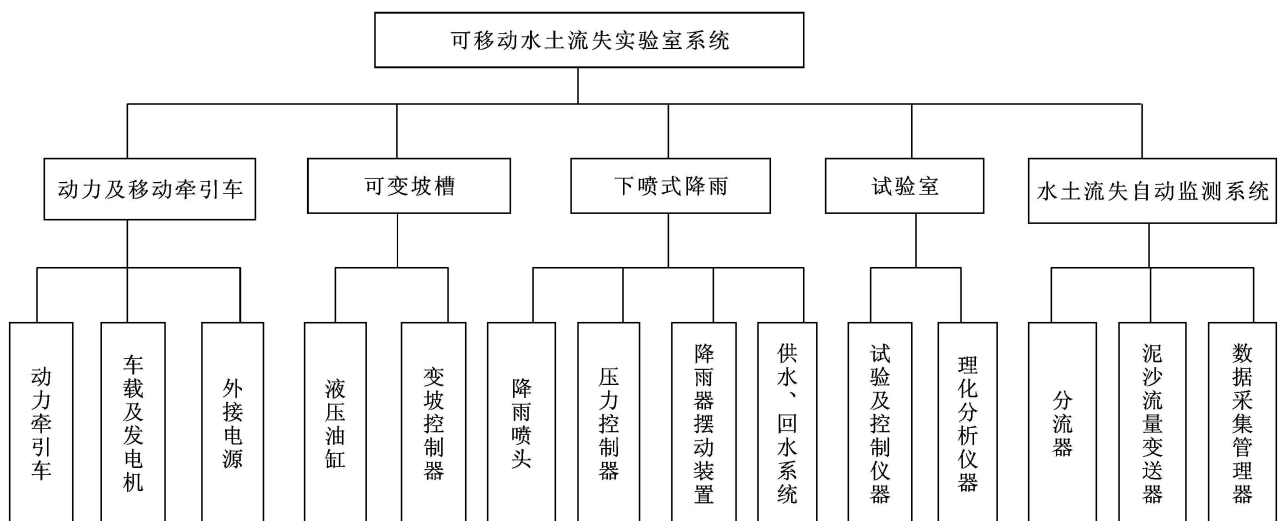


图1 移动式水土流失实验室系统组成

(5) 试验室。试验室安装在载重卡车底盘上,试验室内搭载试验控制台用以调节试验台平衡、土槽坡度、降雨器升降和雨强大小以及水泵等;降雨器在运载过程处于低位状态,便于路途运输。在实验时降雨器处于高位状态,保证降雨器模拟雨滴到实验槽面时的能量要求。观测仪器用以监测实验过程中降雨径流和泥沙过程;泥土理化性质分析仪器用以分析坡面土壤含水量、土壤三相组成、固体颗粒粒径、机械组成等。

(6) 水土流失监测系统。水土流失监测由分流器、水分传感器、数据采集管理器组成。实验过程中降雨径流及泥沙含量由集流口处的流量、泥沙含量自动监测装置将这些数据传送到试验室的中央控制系统,并实时在线显示曲线过程及数据存储。水土流失

自动监测参数:(1) 径流流量: $3\sim 6\ 400\text{ ml/s}$,测量误差 3 ml/s ;(2) 泥沙测量范围: $0.5\sim 200\text{ kg/m}^3$,相对误差小于 5% 。

2 实验系统主要技术特点

移动水土流失实验室系统将多项先进功能综合集成一体,形成完整有机的一体化移动水土流失试验集成装置,可以实现各个不同试验现场水土保持科学实验的准确快速、方便、全自动一体化。其主要特点有:(1) 可以在车载和自带动力(发电机和水泵)情况下,方便移动于各种野外试验现场,可对不同类型的原位原状土和扰动土进行各种要素试验,提高实验成果的系统性、可靠性和完整性;(2) 测控系统对降雨

高度、降雨强度以及变坡实验槽进行调控,使用操作方便,测控精度高。采用统一液压系统,对可变坡侵蚀槽进行 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 坡度无级变坡调节,自动测控坡度变化,同时使降雨器自动垂直;(3)实现了不同下垫面坡度模拟、不同降雨雨强的模拟测控,降雨强度连续变化范围大,雨滴大小控制范围宽,降雨均匀度系数较高,可任意降雨历时。该系统首先采用自动测控系统,可现场实时在线显示存储模拟降雨器的动态变化及曲线,节省大量率定、调节和验证时间;(4)适用于野外及室内各种情况下的降雨径流泥沙及流量自动测量,对观测测量结果进行实时在线长期定位自动测量、存储。(5)可同时对试验土壤进行高精度的水分、盐分、养分、温度、粒径等物理化学性能指标测定和分析,保证各项实验研究和成果的同步性。

除了以上所述的可移动性、多源动力、可调节性、高效与快捷性外,移动水土流失实验室将机械传动与电子自动化控制进行集成,多种试验设备有机结合与组装,实现了技术创新。

2.1 摆动下喷式降雨器变坡机构

现有的降雨器一般为组装式结构,这种结构的降雨器均没发现有变坡的结构。在现场设定坡度一般是通过临时垫设实验槽边缘上实现,这种设定方式角度误差大,并且在模拟降雨过程中,由于降雨量(水的重量)的不断加大,角度误差的越来越大,因此不能保证实验的准确性。为克服上述现有背景技术的不足之处,系统提供一种摆动下喷式降雨器变坡机构。它能在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内准确地设定变坡角度,并保证变坡角度的稳定性。具有如下优点:(1)采用钢板作为底板,液压杆作为变坡的支撑力,变坡角度准确,可在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内变化,可满足不同条件下模拟降雨的需要。(2)液压立杆采用高度可调的液压杆,可变换不同的高度模拟降雨,适用范围广。(3)采用对称布置的3个液压立杆固定降雨喷头,可满足降雨的需要,且结构简单。(4)采用在变坡过程中液压立杆始终与底板处于垂直状态的结构,从而使变坡与模拟降雨有效统一。

2.2 车载摆动下喷式降雨器

提供一种车载的、可移动并使用自带电源装置、自带供水和循环系统、全自动调控摇摆下喷式降雨器,它可以在车载和自带动力(发电机和水泵)情况下,方便移动于各种野外试验现场,使用操作方便,测控精度高,降雨强度连续变化范围大,雨滴大小控制范围宽,降雨均匀度系数较高,可任选降雨历时。该系统首先采用自动测控系统,可现场实时在线显示存储模拟降雨器的动态变化及曲线,即对现场降雨测量

结果有直接参考意义,又便于很快调节雨强到实验模拟降雨要求值,节省大量率定和验证时间。

车载移动下喷式降雨器,包括可循环和持续供水的自动供水系统和摆动下喷式降雨器及控制系统。其特征在于自动供水系统和降雨器控制动力由车载配电柜提供,降雨器雨强控制采用在一定水压条件下,用不同型号喷头组合排布并设定摆动频率既可形成设定区域内不同雨强的均匀降雨。喷头摆动控制系统是本降雨器的核心技术部分之一,与现有技术相比,它具有构造紧凑、自动化控制、系统集成度与可靠度高、节水循环效果显著、携带方便等优点。

3 结论

(1)通过对水土流失移动实验室的使用,证明采用本实验室中的液压自动升降的侵蚀槽坡面侵蚀试验可以根据试验情况全天候进行,且坡度可以在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间任意调整。试验项目齐全,数据采集更加方便。人工模拟降雨试验喷头模拟的雨强范围也更宽,可以在 $20\sim 170\text{ mm/h}$ 之间任意调整。能开展不同雨强、不同坡度条件下坡面侵蚀过程研究,可满足坡面土壤侵蚀产流、产沙规律、坡面流水动力学特征等方面的研究工作。同时还可完成多方位的土壤侵蚀环境因子特性的实时动态监测,土壤侵蚀过程多尺度、快速、动态试验观测及数据采集,获取充分的基础数据。为研究开发侵蚀模型、探索水土流失规律提供依据^[9]。

(2)移动水土流失实验室的研制克服了传统实验土槽不能移动、不能随意调整坡度、数据采集慢等缺陷,坡度可稳定准确的调整。加快了数据采集速度,缩短了实验周期。针对长江流域土壤侵蚀特点对传统的实验土槽进行了改进,增加了壤中流收集装置,使得坡面侵蚀实验装置更趋合理。利用该设备能满足开展水土流失基础实验观测等方面的研究工作,可进行开发建设项目水土保持监测,无需在现场布设水土保持监测土建设施,可节省大量人力、物力和财力。同时还可大幅度提高水土保持监测精度,特别是通过不同类型扰动和原状土的降雨侵蚀试验可以直接获得扰动土壤加速侵蚀系数,以及原状土壤的侵蚀背景值,可为水土保持方案编制过程中的水土流失预测提供更为科学的依据。

(3)可移动水土流失实验系统可以扩展成为区域水蚀土壤因子的各种研究方法的实验平台,如区域野外宏观调查和土壤力学指标的定位测试、降雨径流与土壤抗侵蚀性的定量关系、土壤理化性质与土壤可蚀性、区域水土流失土壤因子的时空定位和定量研究等,这需要在以后的工作中不断开发和利用。

[参 考 文 献]

- [1] 沈国舫, 王礼先. 中国生态环境建设与水资源保护利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] Hudson N H. Soil conservation [M]. London: Batsford, 1995.
- [3] 中国大百科全书水利卷编委会. 水土保持分支条目 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.
- [4] 唐克丽. 中国水土保持 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 史德明. 长江流域水土流失与洪涝灾害的关系剖析 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 1-7.
- [6] 师哲, 张亭. 鄱阳湖地区流域水土流失特点初探 [J]. 长江科学院院报, 2008, 6(3): 38-41.
- [7] 高学田, 唐克丽. 神府一东胜矿区一、二期工程中新的人为加速侵蚀 [J]. 水土保持研究, 1994, 1(4): 23-24.
- [8] 刘伟常. 保持水土, 利国利民: 深圳市水土流失现状及防治对策 [J]. 水土保持研究, 1997, 4(1): 2-6.
- [9] 张爱国, 张平仓, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [10] 李智广. 开发建设项目水土保持监测 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [11] 李智广. 水土流失测验与调查 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [12] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning [M]. Washington, D C: Agriculture Handbook U S Department of Agriculture, 1978.
- [13] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [14] 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, 1984, 4(5): 43-48.
- [15] 陈文亮, 唐文丽. SR 型野外人工降雨模拟装置 [J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 106-110.
- [16] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置 [J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27-30.
- [17] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论: 基于降雨地表径流调控利用的水土保持学 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [18] 长江水利委员会长江科学院. 中央级科学事业单位购置项目: 水土流失过程实验系统 [R]. 2006.
- [19] 长江水利委员会长江科学院. 可移动水土流失实验系统设备购置项目竣工验收材料汇编 [R]. 2008.

(上接第 206 页)

- [21] 吴东亮, 刘鹏举, 唐小明, 等. 基于 GIS 的栅格化坡面径流路径模拟与 LS 值计算 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(5): 10-14.
- [22] 张照录, 崔继红. 基于栅格 GIS 土壤侵蚀地形因子的提取算法 [J]. 计算机工程, 2006, 32(5): 226-228.
- [23] 汪邦稳, 杨勤科, 刘志红, 等. 基于 DEM 和 ArcGIS 的修正通用土壤流失方程的地形因子值提取 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 18-23.
- [24] Skidmore A K. Evolution of methods for estimating slope gradient and aspect from digital elevation models [M] // Fisher P. Classics from IJGIS : twenty years of the international journal of geographical information science and systems. London: Taylor and Francis Group, 2007: 111-118.
- [25] 施成熙. 陆地水文学 [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 78-81.
- [26] Ellison W D. Soil Erosion Studies: Part I [J]. Agricultural Engineering, 1947, 28: 145-146.
- [27] Srinivasan R, Engel B A. Effect of slope prediction method on slope and erosion estimates [J]. Trans ASAE, 2008, 7(6): 779-783.
- [28] 水利部水土保持监测中心. 第 4 次全国土壤侵蚀普查技术规程 [Z]. 2009.