

黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响

孙飞达^{1,2}, 王立², 龙瑞军^{1,3}, 路承香², 包正育²

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070;
2. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

摘要: 采用人工模拟降雨的方法, 对仪器自身性能进行了测试, 并分设 5 种不同的降雨强度分别研究半干旱区林地、草地、人工草地和耕地的产流产沙特征。模拟天然降雨最大雨强 5.05 mm/min, 雨量 118.2~300.3 mm/h; 雨滴落地速度、雨滴动能等降雨特征值与天然降雨特征值是一致的; 不同立地条件下径流量、侵蚀模数随雨强的增加而增加, 并与降雨强度呈指数函数或幂函数关系。

关键词: 人工模拟降雨; 降雨强度; 土壤侵蚀; 产流产沙

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2007)02-0016-03

Effects of Farmlands' Soil Erosion Under Different Intensities of Rainfall in Loess Hilly Regions

SUN Fei-da^{1,2}, WANG Li², LONG Rui-jun^{1,3}, LU Cheng-xiang², BAO Zheng-yu²

(1. Faculty of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: The characteristics of rainfall simulator devices and sediment and yield runoff on farmlands were studied by adopting artificial simulation of rainfall in the semi-arid area of Dingxi, Gansu province. 5 different rainfall intensities were divided. The results showed that the maximum rainfall intensity and the precipitation were 5.05 mm/min and 118.2~300.3 mm/h respectively. The water drop falling velocity, power and others rainfall characteristics were unanimous with natural rainfall. The farmlands runoff and soil erosion were increased with the exponential or the power function of the rainfall intensity.

Key words: artificial simulation of rainfall; rainfall intensity; soil erosion; sediment and yield runoff

1 引言

在黄土高原现代生态环境建设中, 气候的变迁, 加上人为活动, 如毁林毁草、破坏植被的耕垦活动都对生态环境造成严重的影响, 引起水土流失。在短期内可引起水土流失的急剧增加和空间的不断扩大, 加剧生态环境恶化的演化。为了给水土保持预防、监督和治理及降雨的高效利用提供可靠的科学依据, 水土流失和降水资源的量化指标及其相应测试手段的研究有其重要的意义^[1]。

在干旱半干旱地区取得准确的径流和侵蚀资料是非常困难的, 人工模拟降雨的研究方法可以在很大程度上加快研究进程, 提高工作效率, 在短时间和不受自然条件的影响下获得大量的资料, 而且还尽可能地量化影响因素, 使研究问题标准化、具体化, 便于深入研究降雨对水土流失的影响。

2 研究方法

2.1 研究区域概况

以甘肃省中部半干旱地区定西市安家沟流域为研究区域。安家沟流域(104°38'~104°40'E, 35°33'~35°35'N), 海拔 1 900~2 250 m, 流域面积 3.84 km²。流域为典型的黄土丘陵沟壑地貌, 地形破碎, 沟壑纵横, 农地分布较广。土壤类型为黄土母质上发育而成的黄绵土及沟道盐渍土。黄土厚度达 40~60 m, 无障碍层次。有机质含量在 0.37%~1.34%, 土壤容重 1.09~1.36 g/cm³。土壤孔隙率平均为 55%, 田间持水量 20%~21%, 凋萎湿度 6%, 土质疏松, 抗蚀性较差。流域内坡度 < 15° 的占 64.7%, 15°~25° 的占 24.1%, > 25° 的占 11.2%。由于土地利用强度较大, 流域内自然植被破坏严重, 土壤侵蚀强烈。土地利用类型主要有: 农地、灌木林地、林地和荒草地, 属中温带半干旱气候区, ≥ 10℃ 年积温 2 239.1℃, 年均降水量 427 mm, 60% 集中在 6~9 月; 年蒸发量为 1 510 mm, 年日照时数为 2 408.62 h, 年太阳辐射为 529 kJ/cm², 无霜期 141 d, 试验条件在半干旱区具有代表性^[2]。

3 试验方法及仪器设备设计

3.1 试验方法

试验小区选在安家沟半阳坡中部, 试验径流小区由二块长 2 m, 宽 0.4 m 和二块长 1 m, 宽 0.4 m 的冷轧钢板组成,

* 收稿日期: 2006-04-20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39960052); 教育部骨干教师计划项目; 中国科学院百人计划资助项目
作者简介: 孙飞达(1979-), 男, 甘肃靖远人, 博士生, 主要从事干旱区生态环境治理及恢复研究; 通讯作者: 龙瑞军。

每个小区面积为 2 m², 其中出水口为一个"V"字形钢板。每组试验时用两个径流小区, 可以分别采集 2 个小区的径流量与泥沙量, 降雨强度选择 5 个强度(参数 1~ 5 表示), 降雨历时为 40 min。

3.2 试验设备及其工作原理

表 1 径流小区基本情况

小区地类	油松	天然草地	坡耕地	人工草地
地形部位	坡中位	坡中位	坡中位	坡中位
小区类型	半阳坡	半阳坡	半阳坡	半阳坡
坡度/°	15°	15°	15°	15°
土壤容重/(g· cm ³)	1. 10	1. 17	0. 78	1. 15
孔隙度	45. 1%	51. 6%	35. 1%	46. 6%
地被物描述	12 棵/ 100 m ² , 苔鲜,	冰草, 蒿子, 野菊:	裸地	129 株/ m ²
	没有植被	平均盖度 75%		
枯落物	干松针平均重为 346. 89 克/ m ²			

3.2.1 人工模拟降雨器的组成

本试验采用的人工模拟降雨设备从澳大利亚引进, 降雨装置由下列部分组成:

(1) 降雨喷头: 共有三个喷头组成, 喷头长度为 14. 5 cm, 喷嘴距地面高度 2. 2 m, 喷嘴摆幅为 23 cm, 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) 降雨支架: 由四根钢管组成, 支架高度为 2 m, 支架脚距为 2. 5 m 的正方形, 此高度的能满足雨滴下落能量达到雨滴终点速度。

(3) 驱动机构: 使喷头往返摆动, 喷头摆动频率可以通过控制参数来调节, 共有 6 种摆动频率, 改善降雨雨滴的分布, 以及扩大喷头的散水面积, 控制降雨量。驱动机构包括电动马达、传动连杆等部分。

(4) 动力系统: 供给降雨装置所需要的动力。主要包括发电机组, 直流稳压电流以及线路设备。

(5) 供水系统和回水系统: 供给降雨装置所需要的用水, 其中一部分用于降雨, 剩余部分从回水系统返回到进水槽。

3.2.2 人工模拟降雨器的性能指标^[3 4](表 2)

(1) 降雨面积。降雨高度 2. 4 m, 喷头供水压力在 0~ 100 kPa 之间, 有效降雨面积小于 2. 5 m× 2. 5 m, 降雨横向(宽度) 可由喷头的摆动角度大小来决定。

(2) 喷头摆动频率。降雨量的大小与喷头的摆动频率有着密切的关系, 摆动速度越快, 降雨量越大。因此研究降雨器喷头的摆动频率有着非常重要的意义。为了测试降雨器的摆动频率, 每次用了 4 个秒表同时进行观测, 为了减少误差, 每次观测摆动次数为 20 次, 重复 5 次, 计算控制参数对应的摆动频率。

(3) 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(降雨器提供的供水压力为 0~ 100 kPa), 降雨强度随着压力的增大而增大。但压力过低时, 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, 但供水压力太大, 雨滴的终级速度太大, 也不能模拟自然降雨的特性。因此本降雨器的压力控制在 60 kPa, 只有通过调节控制器的参数来控制降雨器的摆动速度来调节降雨量。对摆动间歇式降雨装置来说, 传动系统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。试验选用 9 个雨量筒, 呈正方形排列, 每次观测时间为 30 min, 然后计算其平均雨强。

(4) 降雨分布均匀性。降雨分布均匀性测定与雨强的测试方法一致, 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。公式:

$$k=1-\frac{[\sum(H_i-\overline{H})]}{nH}$$

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, 降雨均匀性在各种降雨强度下均匀系数都在 95% 以上, 完全满足自然降雨的特征。

(5) 降雨雨滴动能。较早提出降雨动能与降雨强度的关系是美国 Wshmeier 威斯奇迈尔(1960a) 著名的经验公式:

$$E_1=210.3+89\log i$$
$$E=E_1\cdot H$$

式中: E_1 是某一时段降雨单位面积上(m²) 每 mm 降雨所产生的动能(J/ m² · mm); i ——某时段的降雨强度(mm/ h); H ——某时段的降雨量(mm); E ——某时段降雨单位面积(m²) 上的动能(J/ m²) 。

表 2 降雨强度与控制参数的关系

控制参数	0	1	2	3	4	5
喷头摆动频率/(次· min ⁻¹)	14. 53	12. 43	9. 65	7. 97	6. 78	5. 86
雨强/(mm· min ⁻¹)	5. 05	3. 75	2. 94	2. 46	2. 14	1. 97
均匀系数/ %	98. 1	96. 5	96. 0	96. 2	96. 5	98. 3
动能(J/ m ² · mm ⁻¹)	272. 85	261. 39	251. 92	245. 01	239. 74	236. 44

4 结果与分析

降雨是产生径流和土壤水蚀的先决条件, 径流量和侵蚀量的大小与降雨强度及降雨量非常密切, 并且与土地利用有一定的关系。以往的研究结果表明^[5 6], 在其它条件相同情况下, 不同植被的径流量有明显差异。本文就人工油松林、牧草地、耕地和人工草地植被条件下和不同降雨强度下的径流和产沙进行研究, 定量分析植被与降雨强度对径流和产沙的影响。

4.1 人工模拟降雨器性能及装置特征

该模拟降雨器降雨稳定, 喷洒均匀, 降雨面积可控制在 2. 5 m× 2. 5 m 的面积内; 模拟天然降雨特性灵敏, 精确可靠, 最大雨强可达 5. 05 mm/ min, 雨量 118. 2~ 300. 3 mm/ h; 雨滴降落高度为 2. 4 m, 雨滴落地速度已达终点速度, 雨滴动能等降雨特征值与天然降雨特征值一致;

其装置为组合式结构, 安装、拆卸和运输方便。

4.2 不同降雨强度下径流与土壤侵蚀模数的分异

根据 20 场人工降雨的观测资料, 林带、牧草地、人工草地和裸露耕地径流量和产沙的统计结果见图 1, 2。从图中可以看出, 降雨强度对任何土地利用形式都有较大的影响。在降雨历时 40 min 而降雨强度不同的情况下, 降雨量与径流量和产沙量有非常高的关联度(表 3), 最小的相关程度是 0. 73。当降雨强度增加时, 径流量与产沙量都将大幅度增加, 尤其人工草地与耕地增加最为明显, 最大增加量达 3 倍之多(表 4)。

表 3 降雨历时 40 min 的降雨量与径流与产沙的关系

不同土地利用	径流回归方程	相关系数	产沙回归方程	相关系数
林地	$y=0.9253x^{1.328}$	$R^2=0.8959$	$y=9\times10^{-11}x^{2.1533}$	$R^2=0.9058$
草地	$y=0.663x^{1.4395}$	$R^2=0.8986$	$y=0.6067x^{0.4818}$	$R^2=0.9809$
人工草地	$y=0.0049x^{12.0266}$	$R^2=0.9677$	$y=8.5775e^{2\times10^{-5}x}$	$R^2=0.9685$
耕地	$y=4.4694x^{2.5203}$	$R^2=0.8108$	$y=2\times10^{-1}x^{2.7552}$	$R^2=0.73$

表 4 降雨历时 40 min 不同降雨强度下的径流系数与侵蚀模数

土地利用方式	项目	1	2	3	4	5
林地	径流系数/%	62.3%	53.4%	59.3%	59.5%	43.5%
	次降雨土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)	32.9	16.5	9.6	7.9	9.3
草地	径流系数/%	38.8%	33.0%	38.3%	27.6%	
	次降雨土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)	133.3	116.3	105.9	102.5	
人工草地	径流系数/%	60.1%	38.2%	23.8%	19.6%	24.4%
	次降雨土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)	2168.7	386.4	185.5	163.1	113.2
耕地	径流系数/%	62.3%	52.0%	45.2%	44.0%	17.1%
	次降雨土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)	8461.6	5242.7	4707.4	3324.4	931.8

径流量和土壤侵蚀与降雨强度关系见表 3~4。从表中可以看出雨强与径流量和土壤侵蚀量之间存在较好的指数函数或幂函数关系,这与其他研究者所得指数与幂函数的关系相同^[7-14]。在不同土地利用条件下,降雨强度与径流和土壤侵蚀速率之间的关系也发生了变化。在较低的覆盖度条件下(裸地),降雨强度对土壤侵蚀的影响是主要的,不同土地利用条件下径流和侵蚀速率与雨强之间的关系具有相

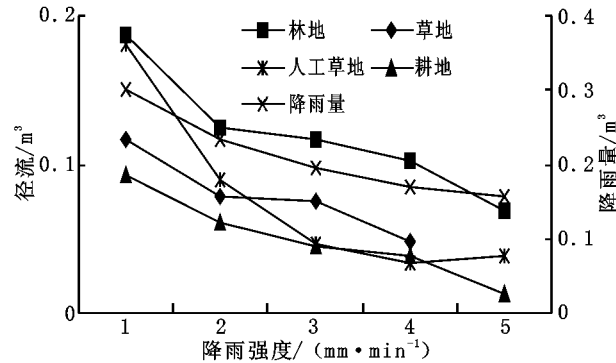


图 1 不同降雨强度历时 40 min 在不同土地利用的产流

5 结 语

经过 20 场的模拟降雨实践证明:该装置是目前国内较先进的野外小型移动降雨装置,该模拟器为组合式结构,安装、拆卸和运输方便;可以达到稳定降雨,均匀喷洒的要求,降雨面积可控制在 2.5 m×2.5 m 的面积内;模拟天然降雨特性灵敏,精确可靠,最大雨强可达 5.05 mm/min,雨量 118.2~300.3 mm/h;雨滴降落高度 2.4 m,雨滴落地速度已达终点速度,雨滴动能等降雨特征值与天然降雨特征值是一

参考文献:

[1] 胡恒觉,张仁陟,黄高宝,等.黄土高原旱地农业[M].北京:中国农业出版社,2002.18-20.

[2] 吴普特,黄占斌.人工汇集雨水利用技术研究[M].河南:黄河水利出版社,2002.60.

[3] 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):106-111.

[4] 孙飞达,蒋志荣,王立.不同降雨强度下农地的产流产杀研究[J].甘肃科学学报,2005,17(1):53-55.

[5] 朱劲伟.红松林和采伐迹地的水量平衡分析[J].生态学报,1982,2(4):335-343.

[6] 朱劲伟.小兴安岭红松阔叶林的水文效应[J].东北林学院学报,1982,(4):37-44.

[7] 贾绍凤.黄土高原降雨径流产沙相互关系的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):42-47.

[8] 张翼.黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J].水土保持研究,2001,8(2):39-47.

[9] 沈玉芳,高明霞,吴永红.黄土高原不同植被类型与降水因子对土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持研究,2003,10(2):13-17.

[10] 岑国平,沈晋,范荣生,等.城市地面产流的试验研究[J].水利学报,1997,10:47-54.

[11] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J].水土保持通报,1999,19(1):1-9.

[12] 于东升,史学正,吕喜玺.低丘红壤区不同土地利用方式的C值及可持续性评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):71-76.

[13] 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.

[14] 赵焕胤,朱劲伟,王维华.林带和牧草地径流的研究[J].水土保持学报,1994,8(2):56-62.

似的变化趋势,即随着雨强的增加而迅速增加。

4.3 不同土地管理措施径流量与土壤侵蚀模数分异

不同的利用方式和管理措施,径流量与土壤侵蚀强度差异很大。表 5、6 中径流和产沙与降雨强度有关,同时受土地利用的影响也是非常严重。坡耕地遭受了极强度侵蚀(次侵蚀模数最大达到了 8 461 t/km²),比黄土高原平均年土壤侵蚀模数大多,人工草地土壤侵蚀次之,最小次土壤侵蚀模数为林地;径流量与土壤侵蚀正好相反。究其原因,人工草地与草地的平均盖度都在 80% 以上,而耕地与林地几乎是裸地,因此盖度对径流与土壤侵蚀的产生影响并不显著,经分析表明主要是由于不同的土地利用造成不同的土壤紧实度,林地与草地表层土壤相对于人工草地与耕地的紧实度要大(林地>草地>人工草地>耕地),在 0~10 cm 表层平均紧实度林地、草地、人工草地与耕地分别为 951, 802, 146, 62 Pa。因此除了降雨强度对径流量和产沙的产生的影响以外,土地利用对径流和土壤侵蚀的影响也非常重要的作用。但降雨条件是不可控的,因此今后研究不同的土地利用条件对径流和土壤侵蚀的影响也非常重要的。

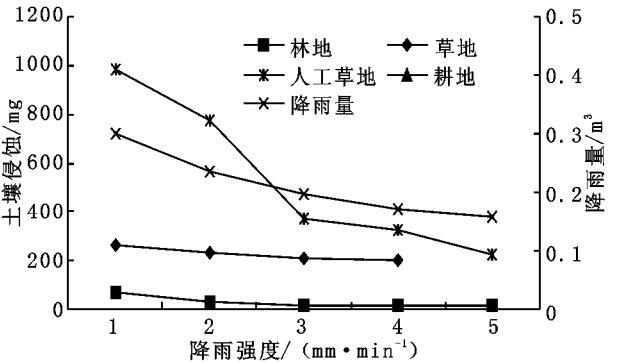


图 2 不同降雨强度历时 40 min 在不同土地利用的土壤侵蚀致的。用人工模拟降雨器获取的径流与土壤侵蚀资料表明:农地径流量、侵蚀模数随雨强的增加而增加,并与降雨强度呈指数函数或幂函数,这与天然降雨的研究结果是一致的。

人工模拟降雨的土壤侵蚀研究采用室外人工模拟降雨器进行模拟降雨,解决了天然降雨获取资料周期长,不便于人为控制降雨诸因子等不足,在今后的水保科研进程中,必将发挥更大的作用。人工模拟降雨虽然克服了天然降雨的诸多不足,但由于其所处小环境和器械本身的局限性,完全与天然降雨相同是不可能的,只是尽可能无限接近。