

黄土高原土壤侵蚀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

周佩华, 张学栋, 唐克利

(中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅自 1992 年竣工以来运转正常, 在降雨面积之大, 降雨强度调节范围之宽, 降雨特性与天然降雨之接近程度, 以及自动化控制程度等方面, 目前均为全国之最。在土壤侵蚀实验研究中发挥了重要作用。在论述土壤侵蚀模拟实验重要意义的基础上, 简要介绍了有关模拟降雨装置 (包括降雨喷头、供水管网等) 的设计依据、选型和布设安装等情况, 并介绍了模拟降雨的基本特征。

关键词: 土壤侵蚀模拟实验; 模拟降雨装置

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2000)04-0027-05

中图分类号: P481, S157.1

Rainfall Installation of Simulated Soil Erosion Experiment Hall of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau

ZHOU Pei-hua, ZHANG Xue-dong, TANG Ke-li

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling District 712100, Shaanxi Province, PRC)

Abstract The rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall has been running well since it was finished in 1992. It is the best on the areas of adjusting range of rainfall intensity, the consistent degree of raindrop characteristics between artificial and natural rainfall, and degree of automatically controlling etc., thus play an important role in soil erosion experiment research. Based on the important meaning of simulated soil erosion experiment, the design evidence about some installations (including rainfall spray nozzle, water supply pipe net etc.), installation selection, and arrangement etc. is introduced briefly. Meanwhile, the basic characteristics of simulated rainfall are also explained.

Keywords simulated soil erosion experiment; simulated rainfall installation

1 土壤侵蚀模拟实验研究的必要性及重要意义

土壤侵蚀的发生发展受地质、地形、土壤、植被、降雨及人为耕种和土地利用等多种因子的影响, 为了搞清这方面的问题, 必须进行大量单因子对比实验以及定性、定量评价。为此, 国外自 20 世纪 30 年代, 我国自 40 年代起, 开始在野外布设径流小区进行观测实验。由于这些观测实验取决于天然降雨情况, 特别是在一些少雨地区, 每年产生径流的次数有限, 使径流小区观测实验工作受到很大限制, 数据积累很慢, 远远不能满足生产的需要。如黄土高原, 各地多年平均土壤侵蚀暴雨 (能产生地面径流的降雨) 频率为

4.69 次/a, 并且年际变化较大。有些地区某些年份不产生地面径流, 个别站不产生地面径流年份所占比例高达 23% 以上^[1]。

为了克服这一困难, 自 50 年代以来, 一些国家大力开展野外人工模拟降雨实验, 使科学数据的取得有了突破性进展。但由于野外受电源、能源、水源以及交通运输等一系列问题的限制, 许多仪表不能使用, 对一些影响土壤侵蚀因子的控制较为困难, 直接影响对土壤侵蚀发生演变过程的动态监测, 因而也影响到观测实验数据的质量。为此, 前苏联、日本、美国、澳大利亚等一些国家先后建立了土壤侵蚀、径流汇集、滑坡侵蚀等各种人工模拟降雨实验室, 以弥补野外实验之

不足。其优点: (1) 可以模拟不同强度的天然降雨,甚至几百年一遇的特大暴雨也可以在实验室内再现,大大缩短了试验周期。(2) 可以使用现代化测试仪表,用水也不存在问题,因而试验水平较高,可以取得高质量的实验资料。(3) 可以严格控制实验条件,对于观测研究土壤侵蚀的发生演变过程以及与各个影响因素之间的内在机理,有很大的优越性

2 模拟降雨实验的基本要求和降雨装置设计依据

模拟降雨实验主要是重演天然降雨、径流、冲刷等过程。因此,要求模拟降雨的降雨特征值(如降雨量、降雨强度、雨滴大小及其组成、雨滴动能以及雨型等),都应与天然降雨尽量一致

(1) 许多实验证明,雨滴对地面的打击作用对土壤侵蚀有显著影响。雨滴对地面的打击所消耗的能量来自雨滴动能,单个雨滴的动能决定于雨滴的大小和降落速度

雨滴在空气中的降落速度最初是逐渐增大的。随着雨滴降落速度的增大,空气阻力也逐渐增大,则雨滴的加速度逐渐减少,最后加速度减为零,雨滴成等速下降。这时雨滴的降落速度达到最大值,叫作雨滴终速。不同大小的雨滴下降时,达到雨滴终速所需要的降落高度是不一样的。根据劳斯(Laws, J. O.) 1941年实验的结果^[2],直径 1.25 mm 的雨滴,降落高度需要 8 m;直径 2 mm 以上的雨滴,降落高度为 20 m 时,其降落速度还有微小的增加。天然降雨的雨滴直径最大可达 6 mm,这种大雨滴达到雨滴终速所需要的降落高度,肯定都在 20 m 以上。但雨滴降落高度超过 10 m 之后,雨滴降落速度的增加已经很小了。如果降落高度按 10 m 计算则所有雨滴的降落速度都已超过其雨滴终速的 95%。因此,对模拟降雨的基本要求之一是雨滴的降落高度必须在 10 m 以上,并且雨滴的大小和组成要尽量与天然降雨相近。

(2) 据有关部门实测资料,黄土高原暴雨强度的上限可达 10.62 mm/min。可见黄土高原的暴雨强度(特别是一些短历时的暴雨强度)相当大

黄土高原的土壤侵蚀主要是由少数几次特大暴雨所引起,往往一次特大暴雨的侵蚀量占年侵蚀总量的 60% 以上,甚至超过 90%。所以我们的实验室以模拟这些大暴雨并观测所引起的侵蚀过程为主要目的,因此,对模拟降雨的第 2 个基本要求是降雨强度要大,能模拟降雨强度为 5 mm/min 以上的暴雨

(3) 从黄土高原的暴雨过程来看,多数是单峰或

双峰暴雨,尤其是连阴雨中夹带的暴雨,雨量较大。另一种是短历时高强度的暴雨,一般雨量较小,具有突发性的特点。总之,在暴雨过程中,雨强是不断变化的。不同雨强的组合对土壤侵蚀有显著影响。为了研究大暴雨对土壤侵蚀的影响,为了能模拟典型特大暴雨的过程,对模拟降雨的第 3 个要求是在降雨不间断的前提下,能根据需要改变降雨强度

(4) 除上述 3 点之外,还要求模拟降雨有足够的均匀性。如果降雨不均匀,所得实验数据很难说明问题,降雨是否均匀是关系到实验成败的关键。

3 模拟降雨装置的设计

3.1 降雨喷头的选择

根据对目前世界各国常用喷头的比较,及我们模拟实验要求,采用旋转喷射式和侧喷式 2 种喷头。

旋转喷射式喷头是一种下喷式喷头,其喷水原理是具有一定压力的水流进入喷头之后,推动喷头内部一个螺旋形的叶片转动,最后以 120° 的角度自喷嘴喷出,散成雨滴下降。喷嘴口径不同,其降雨强度也不同,一般喷嘴直径越大降雨强度也越大。我们共选用 4 种口径的喷头,喷嘴直径分别为 1.9 mm, 2.5 mm, 3.6 mm, 4.4 mm。这种喷头的特点是对水源无特殊要求,一般不会发生喷嘴被堵塞现象,并且更换喷嘴也比较容易。

侧喷式喷头是黄委水科所 1963 年由曾茂林、牟金泽研制而成。其喷水原理是利用压力水流向上射向碎流挡板,使水流导向一侧,在水的重力、空气阻力和射出水流的紊动性所引起的内力影响下,分散成雨滴下降。侧喷式喷头结构如图 1

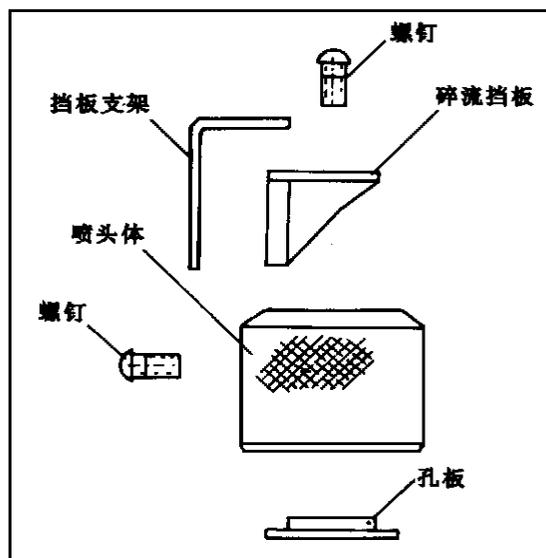


图 1 侧喷式喷头结构

通过喷头内收缩孔板的孔径可以控制降雨强度, 孔径越大, 降雨强度越大。一般每两个喷头为一组互相相对喷, 以增加强雨的均匀性。这种喷头的优点是结构简单, 雨滴组成与天然降雨接近, 最大雨滴直径可达 5 mm。降雨也比较均匀, 能较好地模拟天然暴雨。

3.2 模拟降雨装置的布设

(1) 喷头布设高度。黄土高原典型地区梁峁地面坡度一般为 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 为此我们确定模拟实验槽的最大坡度为 35° (目前 35° 陡坡的实验还无法进行, 从长远考虑也为了留有余地, 仍按 35° 设计)。如果最大坡长 (水平投影) 按 7 m 计算, 当地面坡度为 35° 时, 则实验槽上端抬升高度约 4.9 m, 再加上集水池所占高度 (按 1 m 计算), 则试验槽最上端距地面最大高度为 5.9 m, 如图 2

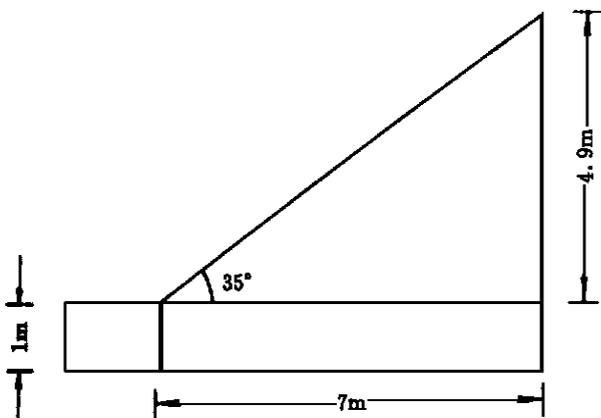


图 2 试验槽布设示意图

为了保证试验槽最上端处雨滴的降落高度在 10 m 以上, 雨滴的降落高度距地面应不小于 16 m。所以, 下喷式喷头的布设高度距地面为 16 m; 侧喷式喷头布设高度为 14.5 m (雨滴从喷头向上喷高 1.5 m 然后下降)。

在黄土高原, 当降大暴雨时, 坡面径流一般随坡长的增加而加大。在室内进行坡长大于 7 m 的实验时, 可以在固定坡长小区进行模拟降雨的同时, 在小区上方放水, 增加必要的坡面径流, 以模拟不同坡长小区的土壤侵蚀情况。

(2) 为了便于安排实验和节约用水, 将模拟降雨大厅划分为 4 个降雨区 (2 个下喷式降雨区和 2 个侧喷式降雨区), 如图 3。2 个下喷式降雨区可以同时降雨, 也可以分别单独降雨。

(3) 采用组合喷头降雨, 以便调节降雨强度和模拟典型暴雨过程。在下喷式降雨区, 每个喷头组由 4 种口径不同的喷头组成。每种口径的喷头系统可单独降雨, 也可由 2 种, 3 种或 4 种喷头系统同时降雨。经

过审定, 各种喷头的降雨强度如表 1。4 种喷头共有 15 种降雨组合, 可以在较大范围内调节降雨强度。如果考虑管道流量的变化, 同一喷头的降雨强度也在一定范围内变化 (如表 2) 则降雨强度的调节范围还将扩大。

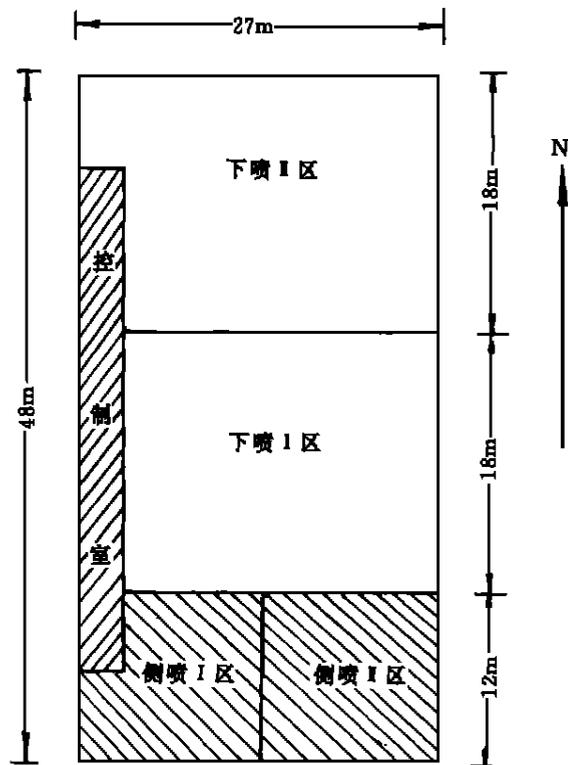


图 3 降雨分区示意图

表 1 下喷式喷头降雨强度率定结果

喷头孔径 / mm	降雨强度 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1.9	0.18~0.57
2.5	0.37~0.88
3.6	0.75~1.92
4.4	1.17~2.50

在下喷 I 区和下喷 II 区各布设 64 组喷头, 共计 128 个喷头组。下喷 II 区喷头组的布置如图 4。

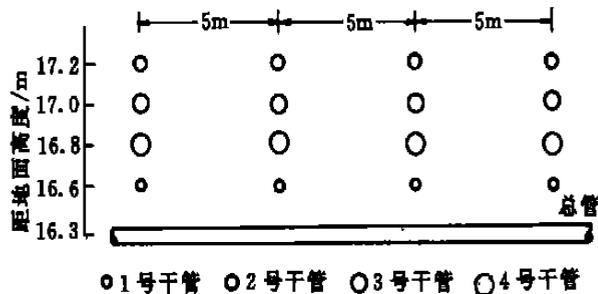


图 4 下喷 II 区喷头组布置示意图 (以第 1 管网系统为例)

各喷头组分布在边长为 2.5 m 的等边三角形的顶点, 相邻各喷头组之间的距离均相等, 可使降雨均匀分布。

在侧喷式降雨区同样用组合喷头降雨,每个侧喷降雨区布设两组侧喷式喷头,互相对喷,每个喷头组由缩流孔板直径不同的 4 个喷头组成。孔板直径分别为 7 mm, 11 mm, 13 mm, 15 mm。经过率定,两个喷头互相对喷的降雨强度如表 2。4 组喷头可单独降雨,也可以 2 组, 3 组, 4 组喷头同时降雨,同样也有 15 种组合,用以调节降雨强度。相邻两不同孔径喷头之间距为 15 cm;各喷头之间均留有约 10 cm 之高差,这样,在各组喷头同时降雨时,水流分层向斜上方喷出,不致互相碰撞。

表 2 侧喷式喷头降雨强度率定结果

孔板直径 / mm	对喷平均降雨强度 / (mm ³ min ⁻¹)	平均压力 / (kg ² cm ⁻²)
7	0.96	2.07~ 2.80
11	1.01	2.50~ 2.60
13	1.38	2.30
15	1.43	2.57~ 2.60

4 供水系统

4.1 下喷降雨区

所有喷头,均由复杂的管网系统供水。为了叙述方便,把喷嘴孔径 1.9 mm 的喷头叫 1 号喷头;孔径 2.5 mm 的叫 2 号喷头;孔径 3.6 mm 的叫 3 号喷头;孔径 4.4 mm 的叫 4 号喷头。

1 号喷头由第 1 管网系统供水, 2 号喷头由第 2 管网系统供水,其余依此类推。每个管网系统布设总管 1 根,布设高程为 16.3 m,东西走向。整个下喷区共布设 8 根总管。

每个管网系统中,总管与干管的连接、干管与支管的连接,以及支管与喷头的连接等,下喷 I 区与下喷 II 区完全相同。以下喷 II 区为例说明如下。

第 1 管网系统包括 1 号总管 1 根,管径为 80 mm,布设高程 16.3 m,东西走向。1 号总管接 1 号干管 4 根,1 号干管直径 50 mm,布设高程 16.6 m,南北走向。每根 1 号干管接 8 根 1 号支管,1 号支管直径 15 mm,布设高程同 1 号干管(16.6 m),东西走向。每根支管接 2 个 1 号喷头,布设高程为 16 m。4 根 1 号干管共接 32 根 1 号支管,连 64 个 1 号喷头如图 4。

第 2 管网系统由 2 号总管连接 4 根 2 号干管, 32 根 2 号支管和 64 个 2 号喷头;第 3 管网系统由 3 号总管控制 64 个 3 号喷头;第 4 管网系统由 4 号总管控制 64 个 4 号喷头,如表 3。

4 根 1 号干管与 4 根 2 号干管, 4 根 3 号干管, 4 根 4 号干管的平面位置完全相同,只是布设高程和管径不同。其立面图如图 5。

表 3 下喷 II 区管网系统表

管网系统	管径 / mm	布设高程 / m	走向	数量	
1 号管网	1 号总管	80	16.3	东西	1
	1 号干管	50	16.6	南北	4
	1 号支管	15	16.6	东西	32
2 号管网	2 号总管	100	16.3	东西	1
	2 号干管	70	17.2	南北	4
	2 号支管	20	17.2	东西	32
3 号管网	3 号总管	125	16.3	东西	1
	3 号干管	80	17.0	南北	4
	3 号支管	25	17.0	东西	32
4 号管网	4 号总管	150	16.3	东西	1
	4 号干管	100	16.8	南北	4
	4 号支管	25	16.8	东西	32

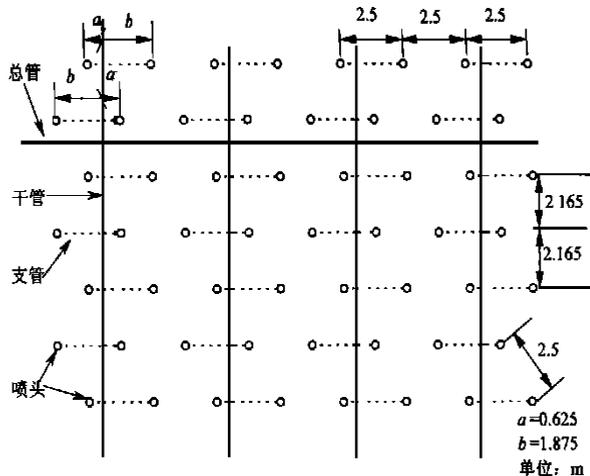


图 5 干管布设立面示意图

4 号各支管每 4 根为 1 组(1- 4 号各 1 根),其平面位置也基本相同,与相应各干管连结,在水平方向伸出一定长度之后,转 90°弯垂直向下,与相应各号喷头连接。每个喷头组的 4 个喷头,分别分布在边长为 0.12 m 正方形的 4 个顶点。

4.2 侧喷降雨区

侧喷降雨区用水量较小,与下喷降雨区相差悬殊,所以在侧喷降雨区采用单独供水系统。侧喷降雨区的管道系统也很简单,该区共有 16 个喷头,分为 4 组,每个喷头连接 1 根带有控制阀门的供水管。侧喷 1 区和侧喷 2 区各设一套压力调节系统,保证调节阀后之压力稳定在 2 kg/cm²左右。通过阀门和压力调节系统可以进行雨区的选择和降雨强度的调节。

4.3 下喷降雨区和侧喷降雨区

统一由特设的蓄水池和泵房供水。蓄水池长为 13.6 m,宽 6.8 m,深 3.5 m,可蓄水 300 t,为地面保

(下转第 45 页)

表 1 研究区评价指标实际值 %

区号	产水系数	人均水量 (m ³ /人)	地均水量 / (m ³ km ⁻²)	工业用水利用率	农业用水利用率	耕地灌溉率
J ₁	0.91	569.77	12.23	0.17	0.76	58.79
J ₂	0.34	128.22	1.09	0.12	0.86	47.73
J ₃	0.31	214.71	1.85	0.125	0.88	38.24
J ₄	0.31	362.69	1.45	0.11	0.66	9.68
J ₅	0.17	123.23	0.74	0.14	0.67	27.08

表 2 水资源可持续利用评价指标评价基准

评价因子	一级	二级	三级	四级
人均水量 (m ³ /人)	1000	500	250	125
地均水量 / (m ³ km ⁻²)	20	10	5	2.5
工业用水利用率 %	80	40	20	10
农业用水利用率 %	100	80	60	40
产水系数	1.0	0.70	0.50	0.20
灌溉率 %	80	60	40	20
结果划分依据 I	1~0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2

(上接第 30 页)

温式。由 1 台水泵向侧喷降雨区供水, 两台水泵向下喷降雨区供水。

5 自动控制系统

为了能精确地设定和控制降雨强度, 必须自动控制水泵供水, 切换水系统, 自动调节流量。侧喷降雨区采用电磁阀控制, 设置 2 套压力调节系统和遥控选路系统。下喷降雨区采用气动控制, 设 8 个选路控制系统配水, 控制 8 根供水总管的开关。选路系统布设在控制室屋顶高程为 11 m 的平台上。另外在控制室内 (高程 7 m) 布设 4 个流量调节器组 (2 个 1 号总管 1 套, 2 个 2 号总管 1 套, 余类推), 进行流量的调节、指示、记录。所有测控仪表, 除一次仪表为就地安装外, 其他指示、调节、记录等仪表集中设置在控制室, 用微型计算机实现自动控制。计算机控制系统, 是中国科学院水利部水土保持研究所和西安交通大学共同研制的, 包括软件及配合软件使用的硬件电路和用于手动控制的控制柜。计算机通过接口电路检测各点压力及流量值, 与程序设定的期望值进行比较后, 按比例

对评价结果进行归一化处理, 划分为 4 级, 分别代表可持续、基本可持续、不可持续和严重不可持续。

关于水资源可持续利用评价研究是当前水文学与水资源研究的一大热点, 各家观点不同, 本文建立的水资源可持续利用评价指标体系和方法应用只是一种尝试, 其中难免有许多不足, 需要在以后的科研工作中不断完善和提高。

[参 考 文 献]

- [1] 范荣生, 王大齐. 水资源水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 陈家琦, 王浩. 水资源学概论 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 冯尚友, 梅亚东, 等. 水资源持续利用系统规划 [J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 1-6.

一积分—微分控制算法, 自动调节阀门开度, 保证降雨强度恒定及按设定的时间规律变化, 实现对降雨全过程的自动化控制^[1]。

在实验室内进行土壤侵蚀模拟实验有其重大意义, 但也有其不足之处。主要是室内条件与自然界的条件总是有一定差异。另外, 在室内进行较大面积的原状土实验, 或者研究植被因素对土壤侵蚀的影响时, 就要受到很大限制, 甚至是做不到的。为了解决这些问题, 今后应以室内模拟实验为基础, 同时还要进行野外观测和野外模拟降雨实验, 两者互相配合, 互为补充。

[参 考 文 献]

- [1] 周佩华, 等. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究 [J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 1-5.
- [2] Laws J O. Measurements of Fall-velocity of Water Drops and Raindrops [J]. Transactions of American Geophysical Union. 1941, 22: 709-721.

见: 西安交通大学. 模拟降雨实验厅计算机控制系统使用说明书 (资料), 1993.