

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.020

人工模拟降雨装置的设计及其参数率定

苏激娜, 田一梅, 高波, 赵鹏

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: [目的] 针对水环境领域中地表径流的水质研究所需的降雨特点, 设计了一种人工模拟降雨装置。[方法] 该模拟降雨装置采用 3 个规格不同的喷嘴式喷头, 利用不同喷头的启闭与组合实现不同雨强的模拟。[结果] 经率定, 此装置降雨强度可达 0.3~2.0 mm/min, 在此范围内降雨均匀系数均在 85% 以上, 雨滴中数直径的范围为 1.09~2.25 mm, 最大雨滴直径不超过 6 mm, 雨滴终点速度可达到 2~2.9 mm/s。[结论] 该装置模拟降雨与天然降雨的相似程度较高, 可用于模拟真实的降雨情况。

关键词: 模拟降雨装置; 雨强; 喷头; 雨滴直径

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)06-0120-04

中图分类号: P481, S157

Design and Calibration of An Artificial Rainfall Simulator

SU Weina, TIAN Yimei, GAO Bo, ZHAO Peng

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: [Objective] Designing an artificial rainfall simulator according to the rainfall characteristics required in surface-runoff water quality research in water environment field. [Methods] An artificial rainfall simulator was introduced, which has three specifications of nozzles in order to simulate different rainfall intensity by their open and close. [Results] By means of calibration, the rainfall intensity of this artificial rainfall simulator was 0.3~2.0 mm/min; and in that range of intensity, rainfall uniformity coefficients were all over 85%. The median diameter of raindrop was 1.09~2.25 mm; the maximum diameter was smaller than 6 mm; the raindrop terminal velocity was 2~2.9 mm/s. [Conclusion] The rainfall characteristics was similar to the natural rainfall. This device can be used to simulate the real rainfall.

Keywords: artificial rainfall simulator; rainfall intensity; nozzle; raindrop diameter

近年来, 中国对雨水利用、水土保持等方面的研究逐步深入, 而此类研究都需要以大量的试验数据为基础, 然而降雨的不确定性给研究工作带来了很大的困难。尤其是在一些干旱少雨的地区, 每年降雨场次过少, 满足不了数据收集的要求。因此, 越来越多的研究人员采用人工模拟降雨的方式进行试验研究。早在 20 世纪 30 年代初, 就有学者使用喷壶作为雨滴发生器来进行模拟降雨试验, 这就是最早最简单的人工模拟降雨器。随后使用一些结构简单的喷管形式, 作为降雨器^[1]。随着对于降雨特性的研究逐渐深入, 中国从 20 世纪 50 年代开始应用人工模拟降雨装置进行土壤入渗试验^[2]。此后, 人工模拟降雨装置的研制受到了重视, 不同类型的模拟降雨装置被研制出来并逐步得到改善, 应用于各类水土保持、水质检测等领域。1997 年, 黄毅等^[3]研制出单喷头变雨强模拟降雨装置, 有效降雨面积为 20~40 m², 降雨强度 30

~150 mm/h, 降雨均匀系数 $K \geq 0.8$ 。之后, 刘素媛等^[4]研制了由 6 种不同孔径(7, 9, 11, 13, 15, 17 mm)的喷嘴和碎流板组成的 SB-YZCP(野外移动、组合、侧向、喷洒式)人工降雨模拟装置。高小梅等^[5]采用医用注射针头在一圆圈内振动洒落水滴来模拟降雨的方法, 研制了具有降雨强度可变范围较宽(小降雨器 2~100 mm/h, 大降雨器 4~100 mm/h)的人工模拟降雨装置。模拟降雨与天然降雨的相似程度将决定试验的准确性, 通过率定各降雨特性参数, 并与天然降雨相比较, 有利于保证试验的准确性。通过模拟降雨器可以使降雨具有可控性, 方便试验研究, 例如通过降雨器控制雨强的大小, 可以研究不同雨强下地表径流中污染物的变化规律; 控制不同的雨滴大小分布研究其对土壤侵蚀程度的影响。因此, 针对目前人工模拟降雨装置的特点和不足, 结合天然降雨的特点, 本文主要针对水环境领域中地表径流的水质研究

收稿日期: 2014-09-28

修回日期: 2014-11-26

资助项目: 环境保护部水体污染控制与治理科技重大专项“海河干流水环境质量改善关键技术与综合示范”(2014ZX07203009)

第一作者: 苏激娜(1989—), 女(汉族), 黑龙江省大庆市人, 硕士研究生, 研究方向为水环境。E-mail: xina_kid@163.com。

所需的降雨特点,设计人工模拟降雨装置,并对其进行参数率定。

1 降雨装置与测定方法

1.1 降雨装置的设计

目前的人工降雨装置通常按雨滴的形成方式划分,人工模拟降雨装置主要可分为 4 种类型,即喷嘴式、喷洒式、悬线式和针头式^[6]。喷嘴式是使用具有不同孔径大小的喷头,通过调节供水压力来改变雨强;喷洒式是利用一些平行的细管上不同直径的小孔,通过变化供水压力使小孔喷出的水滴以不同雨强降落;悬线式是水在悬线中以水滴形式离开并降落至地面,这种方式下雨滴大小是均匀的;针头式是水滴通过针头末端降落到地面。本文所设计的模拟降雨装置采用喷嘴式喷头,使雨滴降落前获得一定的初始速度,并且雨滴大小不均匀,符合天然降雨的特点。本装置设有 3 个喷嘴式喷头,分别具有大(4 mm)、中(2.5 mm)、小(2 mm)3 种不同大小的圆形孔径,针对不同强度的降雨,采用不同规格的喷头,可以使模拟雨滴形态更接近于真实情况。喷头安装于门字型支架上,其中一侧的支架兼具过水和支撑的作用,使用电磁阀控制三个喷头的启闭状态,水泵与支架中间使用软管作为供水管路,其上设有压力表(0~0.6 MPa)和涡轮流量计(L10403028),水泵采用 SZ037-B 型号粤华牌不锈钢离心泵(功率 0.37 kW 流量 0~3.0 m³/h,扬程 35~12 m,汽蚀余量 2.5 m),水泵采用福建巨龙电机集团有限公司生产的三相异步电动机(型号 SZ-YS6332,功率 0.37 kW,电压 220/380 V,电流 1.77/1.02 A,频率 50 Hz)进行变频调速,以便调节流量大小。降雨支架可拆卸,支架下方设有滚轮,方便移动。装置整体高 3 m,宽 2 m,本装置同时具备手动和自动功能,可以满足不同的试验要求。装置结构图如图 1 所示。

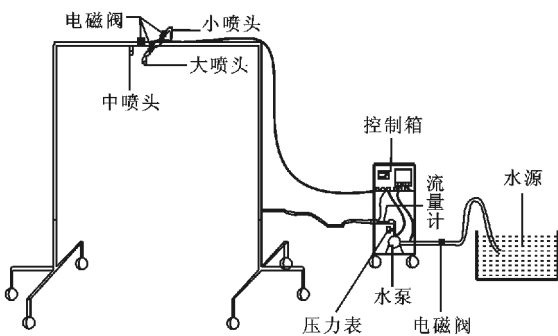


图 1 模拟降雨装置结构图

1.2 测定方法

本装置主要用于研究地表径流的小试试验,实际降雨面积可达 2 m×2 m,根据径流收集的试验要求,

主要针对喷头下方 1 m×1 m 的范围内对降雨强度、均匀性、雨滴大小及分布、雨滴终点速度进行率定及分析,以比较模拟降雨与真实降雨的相似程度。

1.2.1 降雨强度 采用丛台创美仪器设备有限公司生产的自记式雨量计在喷头下方中心位置进行雨强的率定。通过调节水泵的频率控制供水管路中的流量和压力大小,控制不同喷头启闭与组合达到对雨强大小的控制。

1.2.2 降雨均匀性 为了使人工降雨与天然降雨尽量一致,同时减小试验误差,模拟降雨需要具有一定的均匀性才能保证模拟效果良好。目前,降雨分布的均匀程度的表示方法主要有以下两类:(1)绘制降雨量等值线图。根据降雨量率定小区上各测点雨量筒的降雨量或测点的降雨强度,将其等值点连接起来,绘制成降雨量等值线图。(2)以均匀系数大小为根据判断,均匀系数越大,降雨均匀性越好。本装置采用计算均匀系数的方法测定降雨均匀性,在降雨中心位置地面处呈正方形布设 16 个 100 ml 雨量筒,各雨量筒横纵间距 35 cm,利用公式 1 计算降雨均匀系数。

$$K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |H_i - \bar{H}|}{n\bar{H}} \quad (1)$$

式中:K——降雨均匀系数; H_i ——降雨面上的第 i 个测点雨量(ml); \bar{H} ——降雨面上的平均雨量(ml); n ——测量点数(个)。

1.2.3 雨滴直径大小及分布 中国目前研究雨滴大小所采用较普遍的方法是滤纸色斑法^[7],本研究同样采用此方法观测雨滴直径。使用新华造纸厂生产的直径为 150 mm 的中速定性滤纸,使用曙光红和滑石粉的混合粉末作为涂料,按照质量比 1:10 混合均匀,试验前用板刷将涂料均匀的涂抹于滤纸表面,干燥后,滤纸不显色,当雨滴降落在滤纸上时,每个雨滴就产生近似圆形的色斑。在每种雨强下用 3 张滤纸收集雨滴,得到足够数量的雨滴色斑。将滤纸扫描为图片格式导入 AutoCAD 中,调整图片大小使滤纸的直径在 CAD 中测量为 150 mm,则认为此时图片与实际的尺寸比例为 1:1。利用软件中的“标注”工具,标出每个色斑的直径大小。利用此方法,可以大大减小人工测量的误差,并且对于较小的色斑也可以较准确的测量。

2 降雨率定试验结果与讨论

2.1 降雨强度

通过开启不同规格的喷头及利用不同喷头的组合形式控制雨强的大小,率定结果详见表 1。由表 1 可知,雨强大小主要取决于管道压力与喷头规格。对于同种规格的喷头,随管道压力的上升,雨强也逐渐

变大;在相同管道压力的条件下,喷头规格越大,雨强也越大。在试验过程中发现,对于每种喷头,当雨强达到一定值后,增大管道压力只能使降雨面积增大,而雨强不再变化,说明对于每种喷头,都有各自的降雨极限能力,并不能通过无限制的加压使降雨强度无限增大。对于本模拟降雨装置,单独开启小喷头时,最大雨强可达 0.6 mm/min;单独开启中喷头时,雨强可达 1.0 mm/min;单独开启大喷头时,最大雨强为 1.3 mm/min;小喷头和中喷头组合时,雨强上限为 1.6 mm/min;中喷头和大喷头组合时,雨强可达到 2.0 mm/min。

表 1 不同型号喷头雨强大小率定

喷头规格	压力/ MPa	流量/ (L·h ⁻¹)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	频率/ Hz
小	0.04	45	0.3	21.3
	0.06	59	0.3	25.0
	0.08	70	0.4	27.8
	0.10	86	0.5	31.3
	0.12	96	0.6	34.5
	0.14	105	0.6	40.5
中	0.04	125	0.3	12.3
	0.06	139	0.4	19.8
	0.08	156	0.6	28.9
	0.10	175	0.7	32.2
	0.12	195	0.8	34.9
	0.14	213	0.9	37.7
	0.16	230	1.0	43.2
大	0.18	245	1.0	50.0
	0.04	185	0.5	16.3
	0.06	193	0.6	19.8
	0.08	238	0.8	25.5
	0.10	294	1.0	31.0
	0.12	352	1.1	36.2
	0.16	406	1.2	43.5
	0.18	463	1.3	48.2
	0.20	482	1.3	50.0
	小、中	0.04	215	0.6
0.06		226	0.6	16.3
0.08		245	0.8	19.8
0.10		258	0.9	24.0
0.12		271	1.1	32.5
0.14		289	1.3	38.3
0.16		311	1.4	42.1
0.18		333	1.5	45.6
0.20		355	1.6	50.0
中、大		0.04	269	0.8
	0.06	275	0.8	16.8
	0.08	281	1.0	20.1
	0.10	289	1.3	25.4
	0.12	302	1.5	32.6
	0.14	328	1.6	40.0
	0.16	485	1.8	45.1
	0.18	530	2.0	50.0

2.2 降雨均匀性

对于每种喷头,在不同压力下均进行均匀性测试,结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,对于中号和大号喷头,在管道压力小于 0.08 MPa 时,均匀系数不足 80%,不满足天然降雨的均匀性要求,这是由于这两种喷头孔径较大,在低压情况下雨滴不能完全形成,动力不足,不能完全分散开,因此降低了均匀性。其余场次均匀系数均在 85% 以上,部分能达到 90%,装置降雨均匀性良好。结合降雨均匀性可知,本模拟降雨装置,单独开启小喷头时,雨强范围可调节在 0.3~0.6 mm/min 之间;单独开启中喷头时,可用雨强范围为 0.6~1.0 mm/min;单独开启大喷头时,雨强范围为 1.0~1.3 mm/min;小喷头和中喷头组合时,雨强范围为 1.3~1.6 mm/min;中喷头和大喷头组合时,雨强范围可达到 1.6~2.0 mm/min。超出以上范围的雨强在试验条件下均匀性均低于 80%,不能较真实地模拟降雨情况。

2.3 雨滴直径大小及分布

在 AutoCAD 中测量出每张滤纸上的色斑大小后,采用公式(2)将色斑直径换算为雨滴直径。

$$d=0.356D^{0.712} \quad (2)$$

式中: d ——雨滴直径(mm); D ——色斑直径(mm)。

将每种雨强下 3 张滤纸中的色斑直径带入公式后得到雨滴直径,分类统计后,计算出不同直径的体积和,导入 Origin 8.0 软件中,得到每种雨强下雨滴直径的累积曲线图,并以此求出雨滴中数直径。雨滴中数直径是指雨滴累积体积百分数为 50% 时,所对应的雨滴直径。以雨强为 1.0 mm/min 为例,累积曲线图及雨滴中数直径如图 2 所示,得到各雨强下的雨滴中数直径,结果列于表 3 中。

经统计分析,模拟降雨中所有雨滴的直径均小于 6 mm,真实降雨中雨滴直径通常为 0.1~6.5 mm,符合真实降雨的雨滴范围^[8]。

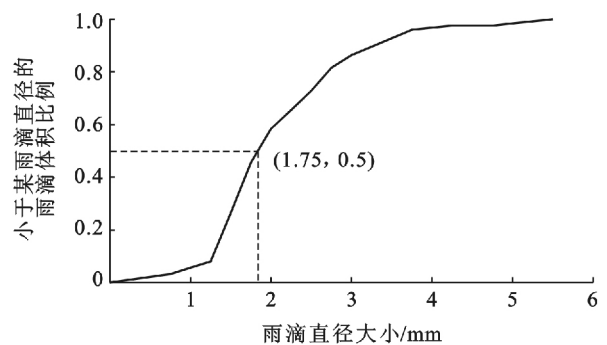


图 2 雨强为 1.0 mm/min 时雨滴直径的累积曲线

表 2 模拟降雨装置降雨均匀系数

%

管道压力	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
小	74.20	86.84	91.65	92.85	91.99	91.47	—	—	—
中	71.47	76.82	91.47	96.16	94.95	96.39	—	—	—
大	65.45	73.28	85.62	92.38	94.51	95.20	96.44	96.12	—
小、中	42.98	49.50	56.37	67.82	77.28	86.55	89.21	94.28	96.03
中、大	47.28	54.28	68.30	71.29	75.33	87.32	89.28	93.56	—

表 3 每种雨强时的雨滴中数直径

喷头规格	小				中			
雨强/(mm·min ⁻¹)	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
D_{50}	1.09	1.21	1.32	1.49	1.64	1.69	1.72	1.75
喷头规格	大			小、中			中、大	
雨强/(mm·min ⁻¹)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0
D_{50}	1.79	1.80	1.81	1.84	1.92	2.05	2.18	2.25

对雨滴中数直径进行回归分析得到公式(3):

$$D_{50} = 0.2189I^{2.7659} \quad (R^2 = 0.9486) \quad (3)$$

式中: I ——雨强(mm/min); D_{50} ——在此雨强下的雨滴中数直径。

由表 3 可知,雨滴中数直径的范围为 1.09~2.25 mm,符合天然降雨的雨滴中数直径。

2.4 雨滴终点速度

劳斯^[9]认为要使所有不同大小的雨滴能达到其相应的终点速度,其最小降落高度需要 20 m,如果只要使 95% 的雨滴达到其相应的终点速度,最小的降落高度可减少到 7~8 m 左右。哥德曼^[10]提出,当雨滴的降落高度大于 4.3 m 时,就能使大雨滴达到终点速度的 80%。美国、澳大利亚等国家的一些学者对雨滴下落速度也进行了研究,结果指出,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。本装置采用喷嘴式喷头,雨滴降落前已经获得一定的初始速度,且降雨高度为 2.5 m,雨滴直径范围为 0.1~6 mm,因此可以使雨滴获得 2~2.9 mm/s 的终点速度。

3 结论

设计的模拟降雨试验装置可用于大部分试验中,通过模拟降雨,极大缩短试验的周期性,解决降雨不确定性等问题。本装置采用喷嘴式喷头使雨滴降落前获得一定的初速度,降雨高度为 2.5 m,采用 3 种不同规格的喷头使降雨与实际情况跟相似。经率定,单独开启小喷头时,雨强范围可调节在 0.3~0.6 mm/min 之间;单独开启中喷头时,可用雨强范围为

0.6~1.0 mm/min;单独开启大喷头时,雨强范围为 1.0~1.3 mm/min;小喷头和中喷头组合时,雨强范围为 1.3~1.6 mm/min;中喷头和大喷头组合时,雨强范围可达到 1.6~2.0 mm/min,在此范围内降雨均匀系数均可达到 85% 以上。雨滴中数直径的范围为 1.09~2.25 mm,最大雨滴直径不超过 6 mm,雨滴终点速度可达到 2~2.9 mm/s,符合天然降雨的特点,模拟性良好。

[参 考 文 献]

- [1] 陈文亮,王占礼. 国内外人工模拟降雨装置综述[J]. 水土保持通报,1990,4(1):61-65.
- [2] 代肖,张海涛,周大迈等. 人工模拟降雨装置及其应用介绍[J]. 中国水土保持,2012(12):52-54.
- [3] 黄毅,曹忠杰. 单喷头变雨强模拟侵蚀降雨装置研究初报[J]. 水土保持通报,1997,4(4):105-110.
- [4] 刘素媛,韩奇志,聂振刚,等. SB-YZCP 人工降雨模拟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.
- [5] 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.
- [6] 吴长文,徐灵娟. 摆喷式人工降雨机的特性试验[J]. 南昌大学学报:工科版,1995,17(1):58-66.
- [7] 窦葆璋,周佩华. 雨滴的观测和计算方法[J]. 水土保持通报,1982,2(1):44-47.
- [8] 吴光艳,郝民利,刘超群等. 天然降雨与人工降雨特性的研究[J]. 人民珠江,2013(2):5-7.
- [9] Laws J O. Measurements of fall-velocity of water drop sand raindrops[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1941,22(3):709-721.
- [10] 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.