

Veejet80150 喷头特性及其在降雨机中的应用

常琪琪¹, 刘宝元¹, 刘瑛娜², 路炳军³, 符素华¹

(1.北京师范大学 地理科学学部 地理学院, 北京 100875; 2.北京师范大学 地理科学学部

地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3.北京易科立德生态环境科技有限责任公司, 北京 100141)

摘 要:由于人工模拟降雨可以解决天然降雨耗时长、成本高以及难以取得精准控制数据等问题,越来越多的学者使用该方法进行科学研究。通过降雨量测量和计算分析方法,测定了 Veejet80150 喷头降雨特征参数,评价了改进后槽式下喷模拟降雨机的降雨均匀性。结果表明:Veejet80150 喷头降雨面积为矩形,且随喷头高度增加而增加,中心点降雨强度随高度增加而减小,并从中心点向外呈规律性减小,便于多喷头组合,获得空间均匀降雨。多喷头组合降雨时,2.5 m 高度下的降雨均匀系数在 0.88~0.90 范围内;4 m 高度下的降雨均匀系数在 0.94~0.95 范围内,该降雨机均匀性好,喷头高度大于 2.5 m 时可满足试验要求。

关键词:人工模拟降雨;降雨强度;降雨均匀性;模拟降雨喷头;喷头高度

中图分类号:S157; P481

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0130-05

Characteristics of Veejet80150 Nozzle and Its Application in Rainfall Simulator

CHANG Qiqi¹, LIU Baoyuan¹, LIU Yingna², LU Bingjun³, FU Suhua¹

(1.School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.Beijing Eco-leader Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100141, China)

Abstract: The observation of natural rainfall is time-consuming, cost and laboring, artificial rainfall simulation can solve these problems. By measuring, calculating and analyzing rainfall, the rainfall characteristic parameters of Veejet80150 were determined, and the uniformity of the improved trough rainfall simulator was evaluated. The results show that: The rainfall area of Veejet80150 nozzle is rectangular. As the height increase, the rainfall area increase, and the rainfall intensity at the central point decreases. The rainfall intensity of single nozzle decreases regularly from the central point outward, so as to facilitate the combination of multiple nozzles and obtain uniform rainfall in the space. In the case of multiple nozzles combination, the uniformity coefficient of the rainfall simulator at the height of 2.5 m is within the range of 0.88~0.90, and at the height of 4 m is within the range of 0.94~0.95. The rainfall simulator has good uniformity and can meet the best requirements when the nozzle height is great than 2.5 m.

Keywords: artificial rainfall simulation; rainfall intensity; rainfall uniformity; nozzle of artificial rainfall; height of nozzle

人工模拟降雨是广泛用于土壤侵蚀规律研究、预报模型建立及水土保持措施效益分析与评价的一种试验方法^[1]。人工模拟降雨通过大幅度缩短研究周期来加快研究进程,从而在较短时间内获得大量数据资料^[1-4]。人工模拟降雨装置可根据试验目的进行不同试验条件的组合(不同降雨强度、雨量、雨型等),获

得天然条件下难以观测到的数据^[2,4]。人工模拟降雨在历时、效率、试验条件控制等方面具有极大优势,解决了天然降雨耗时长、成本高、难以取得精准控制数据的问题^[2-3]。

人工模拟降雨的实现为地学、农学、林学等领域的许多研究做出了重大贡献^[5]。人工模拟降雨机

收稿日期:2020-04-11

修回日期:2020-05-20

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察“土壤质量变化及其对生态系统的影响”(2019QZKK0306)

第一作者:常琪琪(1995—),女,陕西佳县人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:201821051017@mail.bnu.edu.cn

通信作者:刘宝元(1958—),男,陕西佳县人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:Baoyuan@bnu.edu.cn

最早在 20 世纪 30 年代初被美国用于坡面产流和土壤侵蚀过程试验研究^[6-7]。40 年代末人工模拟降雨装置的研制受到重视,不同类型的人工降雨装置不断被研制出来^[4,8]。1958 年 Meyer 等^[9]研制出了槽式人工模拟降雨机,被广泛应用于土壤侵蚀及相关研究中,之后不断有学者对槽式人工模拟降雨机进行了改进^[1,10]。我国 20 世纪 60 年代有学者开始研制人工模拟降雨机^[4],60—70 年代人工模拟降雨机研制及试验方法渐渐被更多学者接受认可^[6],至 80 年代人工模拟降雨机研制技术逐渐成熟,新世纪后进入快速发展阶段^[11],目前我国学者已研制出了各种适于不同试验要求和研究目的的人工模拟降雨装置^[12]。

喷头是降雨机最重要的部分,直接决定了模拟降雨的雨滴大小、分布和降雨动能等与天然降雨的相似性,直接影响到人工模拟降雨试验规律与天然降雨试验规律的相似性。如柯奇画和张科利^[11]的研究发现当其他条件相同时,静止喷嘴式降雨机在黄绵土上得到的土壤流失量不到天然降雨的 50%,且土壤流失量随坡度的变化规律也明显不同。因此,选择合适的喷头是人工模拟降雨机的关键。Meyer 等^[9,13-16]的研究表明 Veejet80150 喷头能产生与天然降雨更相似的雨滴直径、分布及降雨动能。但是到目前为止,还缺乏对 Veejet80150 喷头在不同高度以及不同降雨强度的降雨特性及降雨均匀性的系统研究。因此本文拟评价不同高度以及不同降雨强度条件下 Veejet80150 喷头的降雨特性,以及多喷头组合的降雨均匀性,为 Veejet80150 喷头的模拟降雨机使用提供相关的技术参数和科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 降雨机简介

北京师范大学房山试验基地人工模拟降雨大厅内的槽式下喷模拟降雨机,是由北京易科立德生态环境科技有限公司与北京师范大学联合对旧款降雨机进行升级改造后的产品。本人工模拟降雨系统包括 10 台降雨机,主要由降雨系统、控制系统、供排水系统 3 部分组成。降雨系统包括连动杆等动力装置和喷头等喷洒装置。喷头采用 Veejet80150 喷头,与连动杆连接,沿降雨机长轴方向摆动。每台降雨机有 5 个喷头,喷头间距离为 1.1 m,相邻降雨机间距离为 1.5 m,为了便于多喷头叠加喷洒,获得均匀降雨,单个喷头降雨面积至少应为 $(1.1 \times 2) \text{ m} \times (1.5 \times 2) \text{ m} = 6.6 \text{ m}^2$ 。控制系统由电脑与控制电路组成。通过设置不同降雨强度与降雨历时来模拟不同的降雨条件,然后由电脑及控制电路决定连动杆摆动速率。可设置降雨强度范围为 0~200 mm/h,以 1 mm/h 为增量。供排

水系统主要包括供水箱、水泵等供水装置以及水槽、水箱等回流排水装置,供水水压为 0.04 MPa。

1.2 试验设计

为研究 Veejet80150 单个喷头的降雨特性及多喷头的降雨空间均匀性,本研究进行了 3 组试验。(1) 研究单喷头同一降雨强度不同高度情况下降雨强度与降雨面积的变化,为此设计了 1 个降雨强度(60 mm/h),6 个不同高度(2,2.5,3,4,5,6 m),共 6 场降雨。(2) 研究单喷头不同降雨强度情况下降雨面积变化,设计了 6 个降雨强度(15,30,60,90,120,150 mm/h),2 个高度(2.5,4 m),共 12 场降雨。(3) 研究多喷头组合下不同喷头高度降雨机降雨强度差异及降雨空间均匀性,设计 6 个降雨强度(15,30,60,90,120,150 mm/h),2 个高度(2.5,4 m),共 12 场降雨。去过重合部分,3 组试验共 28 场降雨。

单喷头试验时只打开 1 台降雨机的 1 个喷头,其他喷头全部关闭,以降雨喷头正下方为中心位置扩散摆放集雨瓶收集降雨,集雨瓶间距在喷头摆动方向为 11 cm,在与喷头摆动垂直方向为 15 cm(图 1),集雨瓶摆放范围为中心喷头及周边 8 个喷头垂直投影所包围的范围,摆放数量(483~957 个)取决于喷头高度。高度越高,摆放数量越多,原因是下喷式模拟降雨机在进行单喷头降雨时,降雨面积会随喷头的高度增加而增加。降雨机多喷头组合试验采用两台降雨机,在降雨机下方摆放集雨瓶,集雨瓶间距在喷头摆动方向为 11 cm,在与喷头摆动垂直方向为 15 cm(图 2),摆放数量为 11×21 个,共收集 2 台降雨机 6 个喷头下方的组合降雨。

本试验每次降雨总量保持不变,根据不同的降雨强度确定降雨历时,即较大降雨强度对应短历时,时间由长到短分别设置为 60,30,15,10,7.5,6 min。每次降雨结束后,用量筒逐一测量集雨瓶中雨水的体积,经过计算得到单喷头及多喷头组合方案下的多组测点降雨数据。

1.3 数据计算分析

降雨强度计算公式为:

$$I = \frac{10 \times \frac{v}{S_{\text{瓶口}}}}{t} \quad (1)$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); v 为集雨瓶中雨水体积(ml); $S_{\text{瓶口}}$ 为集雨瓶瓶口表面积(cm^2); t 为降雨历时(h)。

降雨面积是收集到雨的所有测点所代表的面积总和:

$$S = \frac{s \times n}{10000} \quad (2)$$

式中: S 为降雨面积(m^2); s 为一个集雨瓶代表的面积

积(cm^2); n 为收集到雨的测点数量。本试验中一个集雨瓶代表的面积为 $11\text{ cm}\times 15\text{ cm}=165\text{ cm}^2$ 。

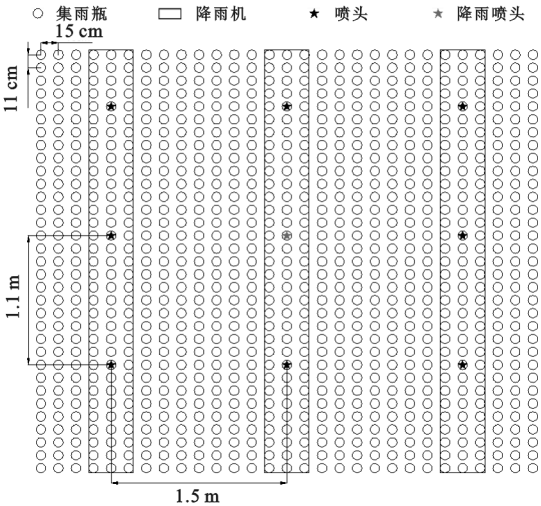


图 1 单喷头降雨时集雨瓶摆放位置示意图

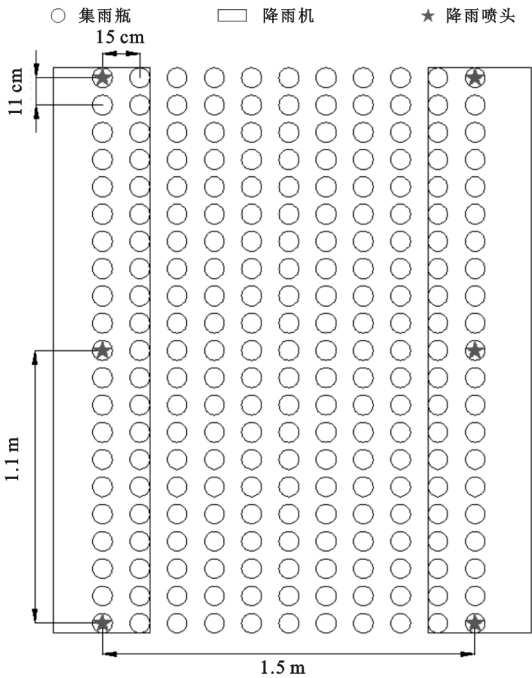


图 2 多喷头降雨时集雨瓶摆放位置示意图

绘制降雨强度等值线是利用 Surfer 软件,以测点间距离为坐标系,利用克里金法插值降雨强度等值线。

降雨强度误差计算如下:

$$\omega = \frac{I_{2.5\text{m}} - I_{4\text{m}}}{I_{2.5\text{m}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ω 为 2.5 m 与 4 m 高度下降雨强度的误差; $I_{2.5\text{m}}$ 为 2.5 m 高度下的降雨强度(mm/h); $I_{4\text{m}}$ 为 4 m 高度下的降雨强度(mm/h)。

降雨均匀性是评价人工降雨机性能的一个重要指标。均匀系数计算^[2]如下:

$$K = 1 - \frac{D}{P} \quad D = \frac{\sum_{i=1}^m |P_i - \bar{P}|}{m} \quad (4)$$

式中: K 为均匀系数; \bar{P} 为测量面积内所有测点的平均雨量(mm); P_i 为各测点雨量(mm); m 为所有测点的总数。均匀系数越大,人工模拟降雨的均匀性越好。

2 结果与分析

2.1 单喷头不同高度及降雨强度对降雨面积的影响

Veejet80150 单喷头降雨面积随高度变化见图 3,由图可知,当喷头高度从 2 m 增加到 6 m,降雨面积由 4.7 m^2 增加到 12.1 m^2 。当高度小于 4 m 时,单喷头降雨面积略小于 6.6 m^2 ,此时,喷头喷洒面积接近该喷头及相邻其他 8 个喷头正下方所覆盖的范围;4 m 高度时,降雨面积约为 6.6 m^2 ,喷头喷洒面积覆盖该喷头及相邻其他 8 个喷头正下方所覆盖的范围;高度大于 4 m 时降雨面积继续增加,喷头喷洒面积越过该喷头及相邻其他 8 个喷头正下方所覆盖的范围。

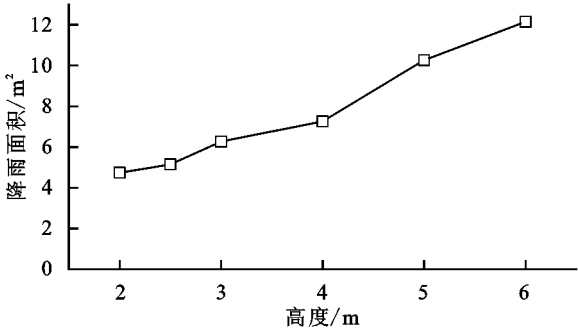


图 3 单喷头降雨面积随高度变化

Veejet80150 单喷头降雨面积随降雨强度变化见图 4,同一高度下,降雨强度增大,降雨面积变化不大,表明单喷头降雨面积不受降雨强度影响,即该降雨机可支持不同降雨强度的降雨试验。

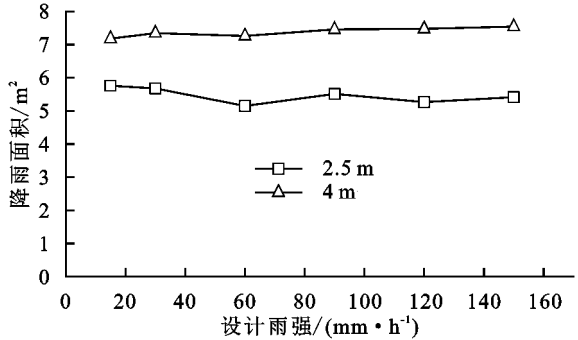


图 4 单喷头降雨面积随降雨强度变化

2.2 单喷头不同高度对中心点降雨强度的影响

以喷头正下方的测点为中心选择 3×3 个测点,计算降雨强度平均值,以此作为单喷头降雨时的中心点降雨强度,其随高度的变化见图 5。由图可知,单喷头降雨的中心点降雨强度随高度的增加而减小,在 4 m 高度后,中心点降雨强度变化大幅度减缓。

2.3 单喷头不同高度降雨强度的空间分布

降雨强度等值线图可以清晰直观地表达降雨强度

的空间分布。由图 6 看出,降雨面积随高度的增加明显增加,中心点降雨强度随高度增加显著减小,降雨范围为矩形。与圆形或椭圆形分布相比,矩形分布的优点主要在于可通过多喷头叠加扩大降雨面积,但不会影响降雨强度的均匀性。在 2.5 m 高度时,降雨范围在垂直喷头摆动方向约为 3 m,刚好为左右两台降雨机间的距离;在喷头摆动方向约为 2.2 m,为同台降雨机前后喷头的距离,当喷头高度大于 2.5 m,降雨面积超出上述范围,因此,2.5 m 高度可满足本降雨装置配置的要求。

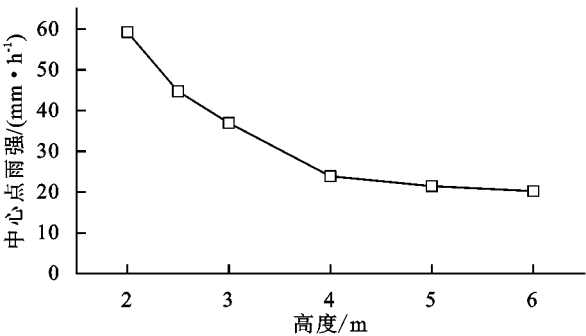


图 5 单喷头中心点降雨强度随高度变化

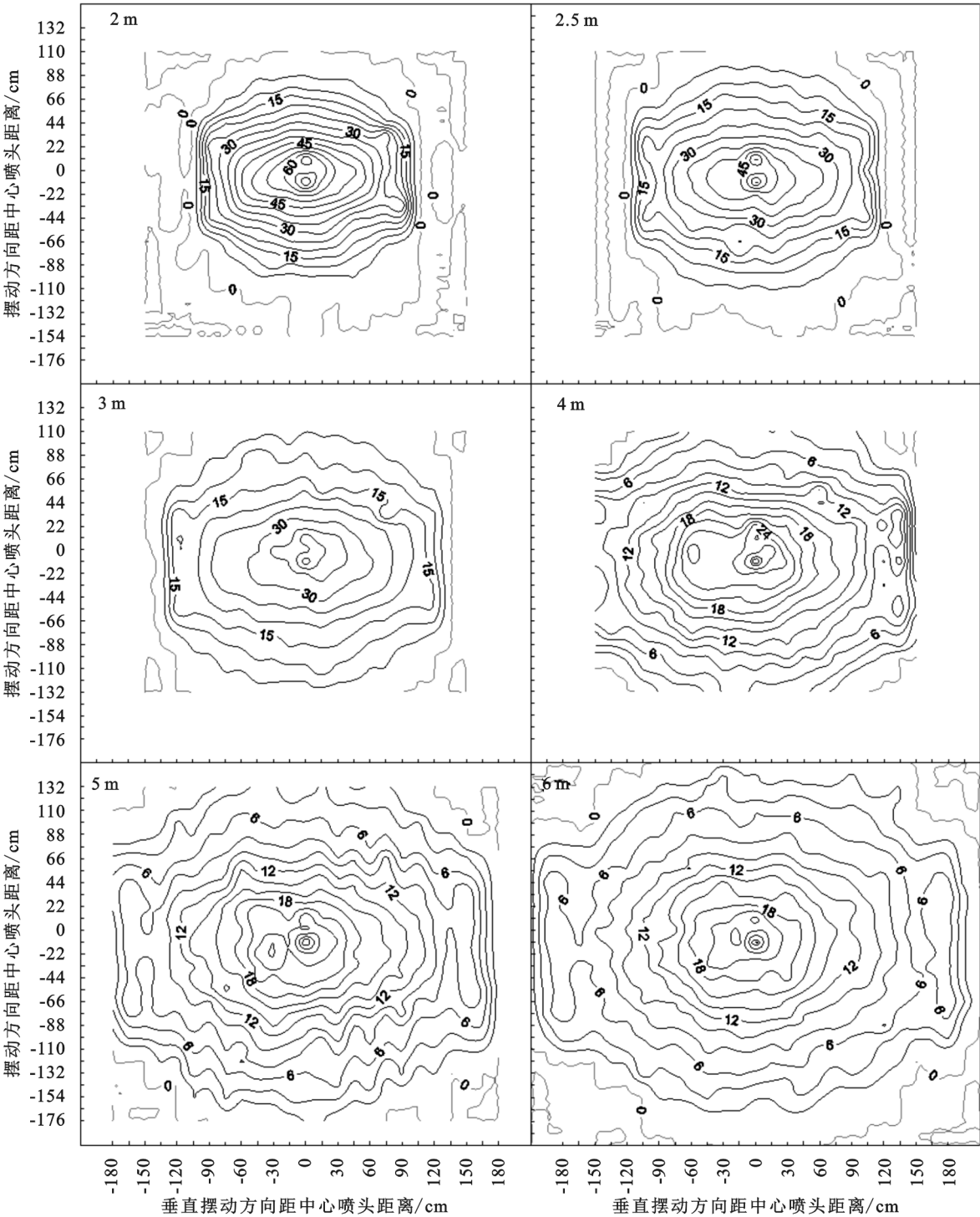


图 6 单喷头不同高度降雨强度空间分布

2.4 多喷头组合的降雨强度及空间均匀性

由表 1 可知,2.5 m 与 4 m 高度降雨强度的误差很小。对 2.5 m 和 4 m 高度降雨强度进行单因素方差分析,检验两者间的显著性,结果显示,在 95%的置信水平下,两个高度的降雨强度间不存在显著性差异。

表 1 不同高度的降雨强度 mm/h

高度		差值	误差/%
2.5 m	4 m		
12.67	12.23	0.44	3.47
28.21	27.37	0.84	2.98
62.27	60.04	2.23	3.58
98.49	96.14	2.35	2.39
134.75	130.33	4.42	3.28
164.49	157.66	6.83	4.15

有研究表明,当降雨均匀系数达到 0.80 以上时认为该降雨机符合均匀性要求^[17]。由表 2 可知,喷头高度为 2.5 m 时,降雨机均匀系数在 0.88~0.90 范围内;喷头高度为 4 m 时,降雨机均匀系数在 0.94~0.95 范围内。均匀系数随高度的增加而增加,且 2.5 m 和 4 m 高度的均匀系数均满足人工降雨机的基本要求,4 m 高度下的均匀性更好。

表 2 不同高度各降雨强度的降雨均匀系数

喷头高度 2.5 m		喷头高度 4 m	
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	均匀系数	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	均匀系数
12.67	0.88	12.23	0.94
28.21	0.89	27.37	0.94
62.27	0.89	60.04	0.94
98.49	0.89	96.14	0.94
134.75	0.90	130.33	0.95
164.49	0.89	157.66	0.94

3 结论

人工模拟降雨机是土壤侵蚀、土壤入渗和降雨产流等研究的有效工具,喷头是降雨机性能优劣的关键,喷头特性率定对喷头选择和降雨机的研发具有重要意义。根据对改进后的槽式人工模拟降雨机进行单喷头及多喷头组合的试验,得到 Veejet80150 喷头特性、该降雨机的实测降雨强度以及空间分布的相关参数,主要结论如下。

(1) Veejet80150 单喷头降雨面积随高度的增加而增加,与降雨强度无关;(2) 单喷头中心点降雨强度随高度增加而减小,并从中心点向外呈规律性减小,便于多喷头组合,获得空间均匀降雨;(3) 多喷头组合降雨时,喷头高度为 2.5 m 时,降雨机均匀系数在 0.88~0.90 范围内;喷头高度为 4 m 时,降雨机均匀系数在 0.94~0.95 范围内,该降雨机均匀性好,喷

头高度大于 2.5 m 时可满足试验要求。

参考文献:

[1] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.

[2] 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.

[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):106-110.

[4] 陈文亮,王占礼.国内外人工模拟降雨装置综述[J].水土保持学报,1990,4(1):61-65.

[5] 赵玉丽,牛健植.人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析[J].水土保持研究,2012,19(4):278-283.

[6] 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):30-33,64.

[7] 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:工程技术版,1995,17(1):58-66.

[8] 谢云,林小鹏,刘英娜,等.槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J].水土保持通报,2008,28(4):1-6.

[9] Meyer L D. An investigation of methods for simulating rainfall on standard runoff plots and a study of the drop size, velocity, and kinetic energy of selected spray nozzles[R]. Usda. Ars. Div. E. S. and W. Man. Branch, Special Report No.81,1958.

[10] Paige G B, Stone J J, Smith J R, et al. The Walnut Gulch rainfall simulator: A computer-controlled variable intensity rainfall simulator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004,20(1):25-31.

[11] 柯奇画,张科利.我国人工降雨侵蚀相关试验的研究进展回顾[J].中国水土保持科学,2018,16(2):134-143.

[12] 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.

[13] Meyer L D, Harmon W C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes[J]. Transactions of the ASAE, 1979,22(1):100-103.

[14] Foster G R, Eppert F P, Meyer L D. A programmable rainfall simulator for field plots[C]//Procedings of the Rainfall Simulator Workshop (Tucson, Arizona). US-DA-SEA-AR, ARM-W-LO,1979:45-59.

[15] Meyer L D. Simulation of rainfall for soil erosion research [J]. Transactions of the ASAE, 1965,8(1):63-65.

[16] Bubenzer G D, Meyer L D. Simulation of rainfall and soils for laboratory research[J]. Transactions of the ASAE, 1965,8(1):73-75.

[17] Aksoy H, Unal N E, Cokgor S, et al. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume[J]. Catena, 2012,98:63-72.