

# 人工降雨设备在农田水文试验中的应用进展

李江, 苏明晓, 史传萌

(河海大学 农业科学与工程学院, 南京 211000)

**摘要:** 人工降雨设备是农田水文试验中的重要供水设备, 为农田水文降雨入渗、水土流失、溶质运移等研究提供了有效的降雨模拟手段, 避免了天然降雨的不确定性, 人工降雨影响试验结果的准确性。本文对国内外人工降雨设备在农田水文试验中的应用进行了研究。从分类、原理以及应用领域等方面对国内外人工降雨设备进行梳理、归纳、总结与展望, 人工降雨设备主要分为针头式、悬线式、管网式与喷头式 4 类, 其在农田水文学研究领域主要应用在土柱试验、土槽试验以及大田试验中, 针头式人工降雨设备在土柱试验中应用较多, 喷头式人工降雨设备在土槽试验和大田试验中应用最为广泛, 管网式和悬线式人工降雨设备在农田水文相关试验中应用较少, 今后人工降雨设备还有望进一步向自动化、智能化、精准化和便携化发展。

**关键词:** 农田水文; 降雨模拟; 人工降雨设备; 试验

中图分类号: S27

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021179

李江, 苏明晓, 史传萌. 人工降雨设备在农田水文试验中的应用进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 69-72.

LI Jiang, SU Mingxiao, SHI Chuanmeng. Review of the Artificial Rainfall Equipment Application on Agro-hydrological Experiments[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 69-72.

## 0 引言

【研究意义】降雨与灌溉是农田水文过程中的重要给水项, 由其引起的土壤水分入渗、土壤侵蚀、溶质运移等现象是农田水文学关注的热点问题。天然降雨具有不确定性, 而使用人工降雨设备的试验周期短, 且可以对降雨进行有效的控制。因此, 开展人工降雨设备在农田水文试验中的应用进展研究具有重要意义。【研究进展】最原始的人工降雨设备出现在 20 世纪 30 年代初, 研究者采用喷壶进行模拟降雨试验。早期人工降雨设备常被应用于土壤水分入渗、土壤侵蚀等方面<sup>[1-5]</sup>, 近年来人工降雨设备的应用领域逐渐向溶质运移上扩展<sup>[6-9]</sup>。目前已有学者在人工降雨设备的应用研究进展方面开展了一些相关工作<sup>[10]</sup>。然而, 很少有学者针对人工降雨设备在农田水文学领域的应用进行综述。【切入点】本文根据农田水文试验中应用的人工降雨设备特点, 对其进行归纳与分类, 并对近年来相关研究进行了梳理和总结, 结合人工降雨设备在农田水文试验中的实际应用对其今后进行了展望。【拟解决的关键问题】旨在为今后农田水文相关试验中如何选用降雨设备提供参考依据, 为今后

农田水文学的相关研究奠定良好基础。

## 1 降雨设备的分类及原理

根据人工降雨设备中降雨模拟器类型可将其分为 4 种, 分别为: 针头式人工降雨设备、悬线式人工降雨设备、管网式人工降雨设备、喷嘴式人工降雨设备。针头式人工降雨设备是由进水管、雨盒、分流筒、分流管和针头等组成, 水滴通过针头末端滴落。悬线式人工降雨设备与针头式类似, 其雨滴发生器为棉线、纤维线等悬线。管网式人工降雨设备是在平行的细管上钻取小孔, 通过施压使水流通过小孔实现降雨。喷头式人工降雨设备, 通过施压使水从喷孔或者喷嘴喷出, 按照水流喷射方向不同, 又分为上喷式、下喷式和侧喷式。目前应用最为广泛的人工降雨设备类型为针头式与喷头式, 悬线式与管网式的应用相对较少。不同类型人工降雨设备的降雨原理及其特点如下:

1) 针头式人工降雨设备: 根据降雨研究需求, 制定不同形状的降雨盘, 并在降雨盘上布置一定数量的针头, 针头可采用医用、工业卡胶、兽用等形式, 其降雨原理为储水设备与降雨盘的水位差。常用的针头式人工降雨设备采用流量计、电磁阀或其他阀件配合针头孔径大小来控制降雨强度。其优点为: 降雨强度的变化范围宽、下限低, 降雨均匀性高、降雨稳定

收稿日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202120)

作者简介: 李江(1989-), 女, 教授, 博士, 主要从事农业高效节水研究。  
E-mail: lijiaang@hhu.edu.cn

等;缺点为:受水质影响针头易堵塞,降雨首末不稳定,降雨控制面积较小,雨滴粒径偏大且单一等。

2) 悬线式人工降雨设备:在盛水的降雨箱底板打上均匀的小孔,在孔中插入规格一致的悬线,悬线种类有:棉线、纤维线、细玻璃、黄铜管等。悬线式人工降雨设备的降雨原理与针头式设备类似,都是利用水位差来供水,雨强大小采用流量计、电磁阀或其他阀件配合悬线类型来控制降雨。其优点为:降雨强度的下限低,降雨均匀性高、降雨稳定等;缺点为:降雨首末不稳定,降雨控制面积较小,达雨滴终点速度需要高度较高、雨滴粒径远大于天然降雨等。

3) 管网式人工降雨设备:在一些平行的细管上钻上一系列小孔,通过水泵等施压设备,将水以一定的初始速度从孔中喷出,以雨滴的形式落到地面。管网式人工降雨设备是通过不同孔径和供水压力来控制雨强大小。其优点为:降雨可控性好、性能稳定,可承担较大面积、雨强可变、具有类似天然降雨的雨滴粒径组成等;缺点为:雨点分布固定、雨滴粒径灵活性差、不易控制,若水质较差,管上的小孔容易堵塞等。

4) 喷头式人工降雨设备:供水系统通过水泵等加压设备从供水箱中吸水,水流通过供水管道被输送至喷淋系统,喷淋系统连接喷头,喷头根据实际需求来连接转动机构实现一定角度的摆动,产生模拟降雨。喷头式人工降雨设备是通过控制供水压力以及喷头的型号来调节雨强大小的。其优点为:较低的安装高度即可达到所需的雨滴终速,具有类似天然降雨的雨滴粒径组成,装卸容易、运输方便等;缺点为:单喷头人工降雨设备的降水面积小,组合喷头的降雨分布均匀性低等。

不同类型人工降雨设备所表现出来的雨滴初始速度、降雨均匀性、应用条件等性质也有所不同。各种人工降雨设备的特性详见表 1。

表 1 不同人工降雨设备及其性质

Table 1 Different artificial equipments and their characteristics

| 类型  | 雨滴发生器   | 性质 |   |                |                |     |       |
|-----|---------|----|---|----------------|----------------|-----|-------|
|     |         | A  | B | C              | D              | E   | F     |
| 针头式 | 针头      | Y  | Y | A <sub>1</sub> | R <sub>1</sub> | I/O | 1/2/3 |
| 悬线式 | 悬线      | Y  | Y | A <sub>2</sub> | R <sub>2</sub> | I/O | -     |
| 管网式 | 钻有小孔的细管 | N  | N | A <sub>3</sub> | R <sub>3</sub> | I/O | 2     |
| 喷头式 | 喷头      | N  | N | A <sub>4</sub> | R <sub>4</sub> | O   | 2/3   |

注 A 雨滴初始速度是否为 0, 是: Y, 否: N; B 降雨是否均匀, 是: Y, 否: N; C 控制面积 (m<sup>2</sup>), A<sub>1</sub> 针头式: 0.007~6.3, A<sub>2</sub> 悬线式: 0.05-1, A<sub>3</sub> 管网式: 8.75~25.44, A<sub>4</sub> 喷头式: 0.30~600; D 降雨强度 (mm h<sup>-1</sup>), R<sub>1</sub> 针头式: 0~450, R<sub>2</sub> 悬线式: 360.0~1002, R<sub>3</sub> 管网式: 1.4~240, R<sub>4</sub> 喷头式: 0.4~380; E 主要应用条件, 室内: I, 室外: O; F 主要应用领域, 土柱试验: 1, 土槽试验: 2, 大田试验: 3。

## 2 人工降雨设备在农田水文试验中的应用

农田水文试验中人工降雨设备的下垫面主要有土柱、土槽以及大田。土柱试验主要用于研究土壤的垂向入渗性能,土槽试验主要用于研究土壤侵蚀、径流汇集、滑坡侵蚀,大田野外试验主要用于研究坡面农田水土、养分的流失情况。

### 2.1 人工降雨设备在土柱试验中的应用

土柱试验主要用于研究土壤的入渗性能,土壤入渗性能是农田水文学中需要研究的重要土壤物理性质。土柱入渗试验装置主要有 4 部分组成:土柱、降雨发生器、供水装置与控制装置。

应用于土柱试验的人工降雨设备类型主要为针头式人工降雨设备,主要原因为其降雨强度下限低,降雨均匀性高且可控性高等特点。针头式人工降雨设备在土柱中的应用早期是用于研究土壤入渗规律。之后随着人工降雨设备的发展和农田水文相关试验研究的不断深入,其逐渐被应用于研究土壤中优先流和污染物迁移的规律<sup>[11]</sup>。近年来,随着智能化的发展,土柱中使用的针头式人工降雨设备也逐渐地朝自动与智能化发展,已有学者利用针盘式降雨器、土柱、马氏瓶、PLC 等设计了一种可用于室内的降雨入渗自动测定系统<sup>[12]</sup>。

土壤入渗性能是人工降雨设备在土柱试验中的基础研究,随着降雨设备在土柱试验中的应用趋于完善,学者们更多关注于溶质在多孔介质中的垂直迁移过程以及污染物迁移的相关理论。在农田水文学科中,盆栽试验与土柱试验类似,学者可在满足规格的土柱中种植作物,通过降雨设备补充水分,研究不同可控条件下作物生长过程中的土壤水分垂向运动与土壤养分运移情况,同时监测作物的生长指标,进一步推求作物需水规律以及肥料的吸收利用状况。人工降雨设备为盆栽试验提供了灵活的给水条件,对农田水文试验的发展具有重要的意义。

### 2.2 人工降雨设备在土槽试验中的应用

在农田水文试验中,土槽试验主要用于研究降雨入渗与产流、水土流失、溶质运移等规律。土槽试验装置主要有五部分组成:水源、土槽、降雨发生器、供水装置与控制装置。与土柱试验不同,土槽需要的水量比较大,一般情况下需要单独的水源,并且供水需要外部压力,常见的外部施压方式有水泵。用于土槽试验的人工降雨设备的降雨器主要有喷头式和针头式。

喷头式人工降雨设备在土槽试验中应用较多,前期主要用于研究降雨入渗、产汇流、水土和养分流失的影响规律。目前随着喷头式人工降雨设备在土槽试验中的不断应用,研究内容也逐渐朝着土壤溶质运移

规律方向发展<sup>[13-14]</sup>。近年来,为便于在野外或不同场地的土槽中进行农田水文相关试验,便携化的人工降雨设备越来越受关注。例如Liu等<sup>[15]</sup>将喷头式便携人工降雨设备应用于土槽,研究了坡面和降雨强度对沟堤土壤径流和土壤流失的影响。

针头式人工降雨设备在土槽试验中应用相对于喷头式略少,其主要用于研究降雨特性对溶质迁移、降雨入渗和水土流失等方面的影响。例如,Parhizkar等<sup>[16]</sup>通过将针头式人工降雨设备应用于木质土槽,评估了水稻秸秆长度和覆盖率对地表径流和土壤流失的影响。

土槽试验将研究尺度从土柱试验的一维扩展至二维甚至三维,降雨径流、土壤侵蚀、土壤养分流失规律等水土保持领域研究结论可为农田水文学研究提供理论基础。在大型土槽中种植作物,利用人工降雨设备,可进一步开展不同降雨/灌水条件下水肥运移、作物生长动态监测,研究其沿土槽方向的空间变异规律,为小区尺度田间试验乃至区域尺度上作物耗水规律以及水肥管理研究提供基础支撑。

### 2.3 人工降雨设备在大田试验中的应用

人工降雨设备在大田试验中的应用主要用于研究田间水土流失和溶质运移的规律。大田试验装置主要由4部分组成:水源、降雨发生器、供水装置与控制装置。用于大田试验的人工降雨设备的降雨器主要有喷头式和针头式。

喷头式人工降雨设备在大田试验中应用较为广泛。相比于其在土槽试验中的应用,喷头式人工降雨设备在大田试验中的应用更侧重于研究不同土地利用类型、耕作措施、地被覆盖度等对入渗、水土和养分流失的影响规律。例如,Yakupoglu等<sup>[17]</sup>研究了极端降雨事件下传统耕作和减少耕作对土耳其小麦和红豆草地区产流和产沙的影响。Yadav等<sup>[18]</sup>应用摆喷式降雨设备在旱地开展降雨模拟试验,研究了吡虫啉和噻虫胺的运移规律。黄俊等<sup>[19]</sup>将下喷式人工降雨设备应用于自然灌草地或清闲休耕地坡面,研究了红壤区植被覆盖因子的变化规律。除此之外,也有部分大田试验研究污泥施用量等对土壤养分和水土流失的影响规律。近年来,人工降雨设备在大田试验上的应用也逐步向便携化发展,而针头式人工降雨设备在大田试验中的应用相对喷头式略少,其主要应用在试验小区以研究降雨入渗规律。

与土柱、土槽试验相比,大田试验更接近实际情况,能反映自然条件下的作物生长、水肥运动状况,人工降雨设备的引入将不可控的自然条件变为可控,根据实际研究需求选择合适的降雨设备,对田间小区进行降雨或灌溉补水,可进一步深入研究农田水文及其伴生过程。

## 3 人工降雨设备在农田水文试验中的应用局限性与前景展望

本文主要针对人工降雨设备的分类、特点以及在农田水文学中的应用进行阐述,根据人工降雨设备的类型特性、应用特点、研究内容等方面论述了人工降雨设备在农田水文学相关研究领域内土柱试验、土槽试验、大田试验中的应用现状。

目前人工降雨设备的研发在国内外已经取得了很大的成就,在农田水文相关试验中的应用也较为广泛。但目前的人工降雨设备仍存在一些局限性,例如:仅能针对某些试验的特定要求进行降雨,还不能满足所有类型试验的任何需求;且降雨设备在农田水文学中的应用会受到很多因素影响,存在受人为控制不精确而造成较大误差的情况,具有雨滴直径、强度等特性难以精准控制的问题;除此之外,试验设备的高成本与不便携性也会加大农田水文相关试验的操作难度。在今后的科学研究以及生产实践中,人工降雨设备在以下几个方面具有广阔的改进与发展前景:降低降雨强度下限,扩大雨强范围,以满足高精度降雨或入渗试验需求;可开发拥有多块组、多结构、多部分组合的人工降雨装置,使其便于移动和携带,且可通过切换不同降雨模式以适用不同类型的降雨试验研究;在降雨设备中可嵌入自动化智能控制装置,增加智能操控功能,减少人为操作带来的试验误差,实现降雨参数的精准化控制。

人工降雨设备除在农田水文试验中的具有重要的实用价值,其在水文学、水力学试验、植物保护、生态修复等方面也具有广阔的应用前景。随着信息技术、生物技术、新材料技术、资源环境技术、人工智能等先进技术在多学科上的融合应用,人工降雨设备今后还会有会进一步向广泛化、自动化、智能化、精准化和便携化发展。

### 参考文献:

- [1] 陈慧,蔡甲冰,陈敏建.覆膜和降雨强度对玉米耗水过程及土壤水分入渗的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(S2):11-19.
- [2] LENZ J, YOUSUF A, SCHINDEWOLF M, et al. Parameterization for EROSION-3D model under simulated rainfall conditions in lower shivaliks of India[J]. Geosciences, 2018, 8(11): 396.
- [3] POLYAKOV V O, NEARING M A, STONE J J. Soil loss from small rangeland plots under simulated rainfall and Run-on conditions[J]. Geoderma, 2020, 361: 114 070.
- [4] 吕春娟,张徐,毕如田,等.间歇降雨对铁尾砂重构坡面侵蚀水力学特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):74-85.
- [5] ZHANG N, ZHANG Q, LI Y Q, et al. Effect of groundcovers on reducing soil erosion and non-point source pollution in citrus orchards

- on red soil under frequent heavy rainfall[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1 146.
- [6] 钱婧, 张丽萍, 王小云, 等. 人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 6-10.
- [7] XING W M, YANG P L, AO C, et al. Mathematical model of ammonium nitrogen transport to runoff with different slope gradients under simulated rainfall[J]. Water, 2019, 11(4): 675.
- [8] GAN F L, HE B H, QIN Z Y, et al. Contribution of bedrock dip angle impact to nitrogen and phosphorus leakage loss under artificial rainfall simulations on slopes parallel to and perpendicular to the bedrock dip in a Karst trough valley[J]. Catena, 2021, 196: 104 884.
- [9] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 98-105.
- [10] 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.
- [11] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 167-174.
- [12] 吕华芳, 杨汉波, 丛振涛, 等. 基于 PLC 控制的室内降雨入渗自动测定系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 144-149, 160.
- [13] 刘娟, 张乃明, 徐红娇, 等. 不同土地利用方式下红壤磷素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 103-110.
- [14] 吕凯, 段颖丹, 吴伯志. 降雨强度和秸秆覆盖对坡耕地烤烟降雨入渗特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 91-97.
- [15] LIU Y X, XIN Y, XIE Y, et al. Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall[J]. Catena, 2019, 177: 92-100.
- [16] PARHIZKAR M, SHABANPOUR M, LUCAS-BORJA M E, et al. Effects of length and application rate of rice straw mulch on surface runoff and soil loss under laboratory simulated rainfall[J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(4): 468-478.
- [17] YAKUPOGLU T, GUNDOGAN R, DINDAROGLU T, et al. Tillage impacts on initial soil erosion in wheat and sainfoin fields under simulated extreme rainfall treatments[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 789.
- [18] 黄俊, 金平伟, 姜学兵, 等. 南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 106-114.

## Review of the Artificial Rainfall Equipment Application on Agro-hydrological Experiments

LI Jiang, SU Mingxiao, SHI Chuanmeng

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211000, China)

**Abstract:** Artificial rainfall equipment (ARE) is an important water supply equipment in agro-hydrological experiment, which can provide an effective rainfall simulation method for the research of rainfall infiltration, soil erosion and solute transport. The uncertainty of natural rainfall can be avoided by AREs, and the experiment results can be influenced directly by the water supply accuracy of ARE. In order to make better use of artificial rainfall equipment in agro-hydrological experiment in the future, this study reviewed the application progress of ARE in agro-hydrological experiments. The domestic and international AREs were sorted out, summarized and prospected from their classification, principle and characteristics. There are mainly four types of ARE, i.e., needle-type ARE, suspension line type ARE, pipe network type ARE and sprinkler-type ARE. They are widely used in the soil column experiments, soil flume experiments and field experiments. Needle-type AREs are widely used in soil column experiments, sprinkler-type AREs are most widely used in soil flume experiments and field experiments. While pipe network type and suspension line type AREs are less applied on agro-hydrological research compared with the other two AREs. AREs are expected to be further developed to be extensive, automatic, intelligent, precise and portable in the future.

**Key words:** agro-hydrology; rainfall simulation; artificial rainfall equipment; experiment

责任编辑: 赵宇龙