doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.10.029

动态水压间歇脉冲喷灌喷洒水力性能研究

葛茂生[1,2]　魏福强[1,2]　吴普特[1]　张骞文[1,2]　薛绍鹏[1,2]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:动态水压喷洒和基于脉冲宽度调制的间歇喷洒对喷头喷洒水力特性均有显著调节作用,为充分发挥动态水压和间歇喷洒的技术优势,本研究通过压缩空气储能调节同步实现动态水压和间歇脉冲喷洒,基于此开发出新型动态水压间歇脉冲喷灌装置,并对动态水压间歇脉冲喷洒条件下的喷灌水力性能指标进行了实测和计算。结果表明,动态水压间歇脉冲喷洒模式下,喷头工作压力呈"急速上升—波动下降—急速下降"三阶段变化趋势,喷头流量较恒压连续喷洒降低 70.23% ~82.77%;径向喷灌强度呈双峰型分布,峰值喷灌强度为连续喷洒下的 12.7% ~33%;喷洒水量分布均匀度较连续喷洒有小幅降低 5.8% ~14.1%,且可通过运行参数优化进一步提升;水滴对表层土壤的打击强度显著降低,动能强度峰值降幅 50.6% ~70.9%。研究结果表明动态水压间歇脉冲喷洒可灵活实现喷洒水力性能指标的同步提升,具有较大应用潜力。

关键词:动态水压;间歇脉冲;喷灌;压缩空气;水力性能

中图分类号:S625.5^{+}1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)10-0294-10　　**OSID**:

Hydraulic Performance of Dynamic Water Pressure Intermittent Pulse Sprinkler Irrigation

GE Maosheng[1,2]　WEI Fuqiang[1,2]　WU Pute[1]　ZHANG Qianwen[1,2]　XUE Shaopeng[1,2]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Both dynamic water pressure spraying and intermittent spraying based on pulse width modulation have significant regulating effects on the hydraulic characteristics of sprinkler spraying. In order to give full play to the technical advantages of dynamic water pressure and intermittent spraying, dynamic water pressure and intermittent pulse spraying synchronously were realized through compressed air energy storage regulation. Based on this, a dynamic water pressure intermittent pulse spraying device was developed. The hydraulic performance indexes of sprinkler irrigation under the condition of dynamic water pressure intermittent pulse spraying were measured and calculated. The results showed that under the dynamic water pressure intermittent pulse spraying mode, the working pressure of the sprinkler head presented a three-stage change trend of "rapid rise—fluctuation decrease—rapid decline", and the flow rate of the sprinkler head was decreased by 70.23% ~82.77% compared with that of constant pressure continuous spraying. The radial irrigation intensity showed a bimodal distribution, and the peak intensity was about 12.7% ~33% of that under continuous spraying. Compared with continuous spraying, the distribution uniformity of spraying water was slightly decreased (5.8% ~14.1%), and can be further improved by optimizing the operating parameters. The impact intensity of water droplets on the surface soil was decreased significantly, and the peak kinetic energy intensity was decreased by 50.6% ~70.9%. The results showed that the dynamic water pressure intermittent pulse spraying can flexibly improve the hydraulic performance index and had great application potential.

Key words: dynamic water pressure; intermittent pulses; sprinkler irrigation; pressurized air; hydraulic performance

收稿日期:2023-03-24　修回日期:2023-04-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52279045)和陕西省创新能力支撑计划项目(2023KJXX-011)

作者简介:葛茂生(1990—),男,副教授,博士,主要从事绿色低能耗喷微灌技术与装备研究,E-mail:gmsnongshui@126.com

0　引言

优良的喷洒水力性能是喷灌技术装备研发与应用的核心目标[1]，也是充分发挥喷灌技术优势的重要保障。对喷灌系统喷洒水力性能进行评价时，主要评价指标包括喷灌强度[2]、喷洒均匀度[3]和水滴打击强度[4]等。其中喷灌强度取值应与土壤入渗率相匹配，以避免地表积水和产生径流[5-6]；喷洒均匀度与作物产量和品质、灌溉水利用率以及喷灌系统经济性等密切相关[7]；喷灌水滴对土壤的打击是造成土壤团聚体破坏和土壤孔隙度降低的直接原因，可导致土壤结皮和入渗率降低，并引发土壤侵蚀[8]。因此，适宜喷灌强度、较高喷洒均匀度和较低水滴打击强度成为喷灌技术装备研发的重要目标。

研究人员从喷头结构设计、喷头工作压力、安装高度或组合间距等参数的优化组合等方面开展研究，对喷灌水力性能指标进行优化提升[9]。其中，动态水压喷洒被证明是改善喷洒水力性能的一种有效途径[10]。葛茂生等[11]研究表明动态水压下低压折射式喷头的喷灌强度和动能强度峰值显著降低。付博阳等[12]进一步探讨了坡地喷灌中，动态水压喷洒对水量分布以及喷洒均匀度的影响。王新坤等[13]基于射流附壁效应设计出一种具有脉冲特性的负压反馈射流喷头，实现在主副喷嘴间连续交替性脉冲射流，并探讨了结构参数对射流脉冲特性的影响。

尽管动态水压喷洒通过改善喷洒水量分布，显著降低了喷灌强度和动能强度的峰值，但未能在保证较大喷头射程的前提下降低喷头流量和平均喷灌强度。在坡地和黏性土喷灌时，允许喷灌强度大幅降低，仍存在较高的地表积水和径流风险[14]。脉冲宽度调制变量控制技术将连续喷洒转变为间歇脉冲喷洒，通过调节喷洒频率和脉冲喷洒时间实现对喷头流量的精量调控，成为目前变量喷灌的主流方法之一[15]。这种技术多应用于大型移动式变量喷灌系统。

针对上述问题，本文基于压缩空气调节能量存储与释放过程的思路，开发一种新型动态水压间歇式脉冲喷灌装置，同步实现动态水压喷洒和间歇脉冲喷洒。在动态水压间歇脉冲喷灌条件下，对喷头的喷灌强度、喷洒均匀度和水滴打击强度等水力性能指标进行实测，并与恒压连续喷洒条件下的水力性能指标进行对比，验证动态水压间歇式脉冲喷灌技术的可行性，以期为协同优化喷灌水力性能指标，综合提升喷灌灌溉质量提供参考。

1　材料与方法

1.1　动态水压间歇脉冲喷洒原理

通过压缩空气对能量进行存储与释放调节，从而实现间歇式动态水压脉冲喷洒，原理如下：灌溉水经水-泵加压后注入图 1 所示的密闭水气罐，随着罐体内水量的增加，罐内空气被压缩，空气分子势能随之升高，该过程可实现对能量的存储；当罐内空气分子势能达到预定值后，罐体下方出水阀门开启，水气罐内水流经喷头射出，空气体积增大，空气分子势能和罐内压力随之降低。喷洒过程在一定时长后停止，完成一个脉冲喷洒周期以及一次能量的存储与释放过程，如此循环往复，形成周期性的能量存储、释放和脉冲喷洒。

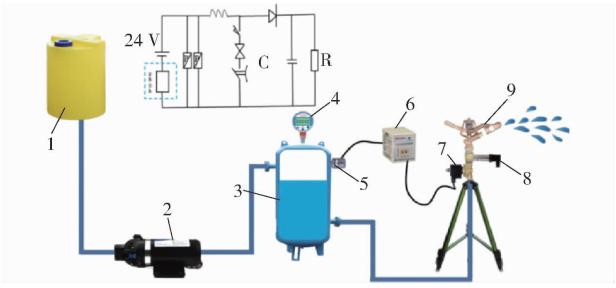

图 1　间歇式动态水压循环脉冲喷洒及阀控原理图

Fig. 1　Intermittent dynamic hydraulic cyclic pulse spraying and valve control schematic

1. 供水桶　2. 水泵　3. 水气罐　4. 数显压力表　5. 压力开关　6. 延时继电器　7. 电磁阀　8. 压力变送器　9. 喷头

1.2　试验平台

试验在西北农林科技大学旱区节水农业研究院灌溉水力学试验厅进行。搭建图 2 所示的循环脉冲喷灌测试平台，其中试验喷头选用 ZY－2 型中压摇臂式喷头，主喷嘴口径 7.0 mm，副喷嘴口径 3.1 mm，主喷嘴仰角为 27°，喷头距地面高度为 2.5 m；电磁阀选用徽正牌直流常闭型电磁阀（DN25，1 寸，

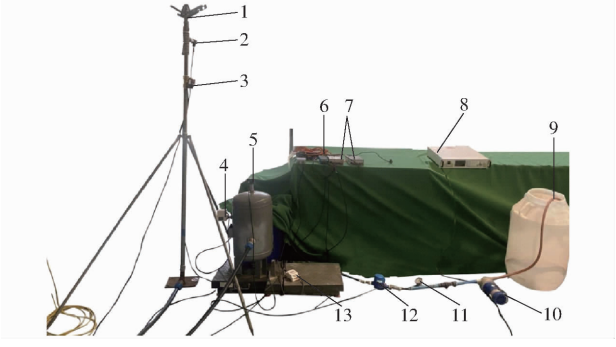

图 2　装置实物图

Fig. 2　Schematic of physical device

1. ZY－2 型摇臂式喷头　2. 压力变送器　3. 电磁阀　4. 压力开关　5. 压力变送器　6. 数据采集器　7. 24 V 直流电源　8. 电源控制器　9. 水源　10. 水泵　11. 压力表　12. SM－10 型卧式水表　13. 延时继电器

ED:100%,IP:00/65);压力变送器选用 CYYZ208 型压力变送器(输出信号 4 ~ 20 mA,RS485 通讯协议,量程 0 ~ 1 MPa,精度 0.5% FS);数字变送器选用 TDA - 04D6 六路变送器(RS485 通讯协议,采样精度 1/100 000);模拟量采集模块选用舟正科技公司生产的 DAQM4206C - 12 路模拟量采集模块(RS485 通讯,标准 Modbus - RTU,精度 ±1‰);水泵选用 DC24V 210 - 5 型隔膜泵(设计扬程 1.3 MPa,额定流量 0.96 m^3/h,额定功率 140 W);水表选用 SM - 10 型智能电子远传卧式水表(过载流量为 7.87 m^3/h,精度 ±3%);水气罐选用立式碳钢水气罐(防爆等级 1.6 MPa,容积 30 L)。

1.3 试验设计

本研究开展间歇式动态水压循环脉冲喷洒与连续恒定压力喷洒室内试验,对比分析两种喷洒模式下的喷洒水力特征参数。根据选用喷头类型,连续恒定压力喷洒条件下选定喷头的工作压力为 0.2、0.3、0.4 MPa。为保证间歇动态压力喷洒条件下喷头具有相同喷洒控制面积,调节压力开关使间歇式脉冲喷洒条件下的喷洒启动压力为 0.2、0.3、0.4 MPa。调节延时继电器设定一次脉冲喷洒时长为 3 s。每组试验测定时长 1 h,重复测定 3 次。

1.4 测定与计算指标

1.4.1 喷头压力与流量

喷头实时工作压力由安装在喷头下方 20 cm 处的数字压力变送器测得,采样间隔 0.02 s。喷头流量通过安装在供水管路上数字远传水表获得,采集系统自动读取测试前后的水表示数,两者差值即为喷头流量。

1.4.2 径向喷灌强度

喷头径向喷灌强度通过沿喷头径向布置的雨量桶(开口直径 19.8 cm,高度 12.2 cm)实测获得。试验过程严格参照 GB/T 27612.3—2011[16] 进行,雨量桶的布置采用放射线布置法在以喷头为端点引出的 3 条射线上(射线夹角 30°),以 1 m 间隔布设并保证雨量桶数量覆盖喷头射程,每次喷洒完成后采用称重法得到各点净喷灌水量,除以雨量桶面积即为该点喷灌强度。

1.4.3 喷洒均匀度

将实测径向水量数据导入 Surfer 软件,通过克里金插值转换成网格点数据[17]。由于考察单喷头喷洒均匀度不具有实际应用价值,本文采用正方形组合设计进行喷头水量分布组合叠加,组合间距分别取 16、18、20、22、24 m,并根据典型叠加区域内的水量分布计算喷洒均匀系数。为综合考察喷洒水量分布的整体均匀性并防止出现局部漏喷,分别计算克里斯钦森均匀系数 C_u 和分布均匀系数 D_u,计算公式为[18-19]

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} | h_i - \bar{h} |}{\sum_{i=1}^{n} h_i}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$D_u = \frac{\bar{h}_{lq}}{\bar{h}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 h_i——测点 i 水深,mm

$\bar{h}$——各测点平均降水深度,mm

n——测点数

$\bar{h}_{lq}$——所有测点按大小排列,1/4 低值测点降水深度平均值,mm

1.4.4 水滴打击强度

水滴打击强度是以喷洒水滴动能表示。通过 2DVD 实测得到水滴数目和速度,计算得到喷洒水滴动能。而喷洒水滴动能以单位体积动能和动能强度表征。本研究通过奥地利 Joanneum Research 公司生产的 2DVD 视频雨滴谱仪实测得到水滴粒径和速度。测点布置与径向喷灌强度测试保持一致,沿喷头径向以 1 m 间隔布置,每处测点测试时长 5 min,在喷洒末端水滴数目较少的测点适当延长测试时间,保证采集水滴数不低于 5 000 个。每处测点完成测试后,将 2DVD 视频雨滴谱仪转移至下一测点继续测量。

(1)水滴粒径与速度

2DVD 内置两台垂直放置的 CCD 相机对通过测试区的每一颗水滴进行扫描,并根据水滴在光栅中形成的正交投影计算得出水滴的三维形状参数[20]。喷洒落在测点处的水均由一系列不同粒径的水滴组成,一般以等效粒径作为各处的特征粒径,体积加权平均粒径被认为能够较好地反映喷洒液滴的尺寸分布[21],计算式为

$$d_v = \sum_{i=1}^{m} d_i^4 \Big/ \sum_{i=1}^{m} d_i^3 \quad (3)$$

式中 d_v——体积加权平均粒径,mm

m——该测点处的水滴数目

d_i——第 i 个水滴粒径,mm

2DVD 内置光源形成间距为 6.2 mm 的两个平行光片层,2DVD 通过计算水滴通过两个光片层的时间与水平偏移量获取水滴的垂直分速度 v_v 和水平分速度 v_h。则水滴的落地速度 v 与落地角度 α 分别为

$$v = \sqrt{v_v^2 + v_h^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan \frac{v_v}{v_h} \quad (5)$$

由于各测点处均有大量不同速度的水滴，为反映水滴速度沿喷洒径向变化的一般规律，将每处测点所有水滴视为一个整体，并赋予它们一个等效速度 v_{eq}，则有[22]

$$v_{eq}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\pi d_i^3\rho_w v_i^2}{\sum_{i=1}^{m}\pi d_i^3\rho_w}} \tag{6}$$

式中　ρ_w——水密度，kg/m

v_i——第 i 个水滴落地速度，m/s

（2）单位体积动能和动能强度

喷洒水滴动能在实测水滴粒径和速度的基础上计算获得，包括动能强度 S_P 和单位体积动能[23-24]，计算式为[25]

$$S_P=K_{EV}\frac{P}{3\,600} \tag{7}$$

其中

$$K_{EV}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\frac{\rho_w\pi d_i^3 v_i^2}{12}}{1\,000\sum_{i=1}^{m}\frac{\pi d_i^3}{6}}$$

式中　P——测点径向喷灌强度，mm/h

K_{EV}——单位体积动能，J/L

2　结果与分析

2.1　喷头压力与流量

连续与间歇喷洒条件下喷头的工作水头对比如图 3 所示。间歇喷洒条件下喷头的工作状态可分为间歇期和脉冲喷洒期，启动压力 0.2、0.3、0.4 MPa 下，间歇期时长随喷洒启动压力的升高而增加，脉冲喷洒时长占总时长的比例分别为 34.6%、25.9% 和 23.2%。取一次“间歇期 + 脉冲喷洒期”为一个完整的脉冲喷洒周期，则喷洒启动压力 0.2、0.3、0.4 MPa下完成 7 个完整喷洒周期的时间分别为 80.5、104.2、115.8 s。

此外，脉冲喷洒阶段喷头工作压力呈现“急速上升—波动下降—急速下降”3 个阶段，其中急速上升和下降阶段时间短，波动下降阶段在整个脉冲喷洒过程中占据较大比例。在急速上升阶段，水气罐内能量快速释放，承压水以冲击波形式到达喷头位置；在波动下降阶段，随着水气罐内能量随射流过程释放，水压逐渐降低；在急速下降阶段，电磁阀在达到预定喷洒时间后关闭，喷头处水压随管道内残余水分的喷出而迅速降低。由于喷头工作压力是决定喷洒水力特性的重要因素[26]，喷头工作压力的波动下降特征是影响喷洒水量分布的关键。如图 3 所示，3 种启动压力下喷头的泄压过程均呈对数型下降趋势，喷头工作水头波动范围分别为 8.7 ~ 20 m、16.0 ~ 30 m 和 12.3 ~ 40 m，相同时间内喷头水头的降幅分别为 11.3、14.0、27.7 m。

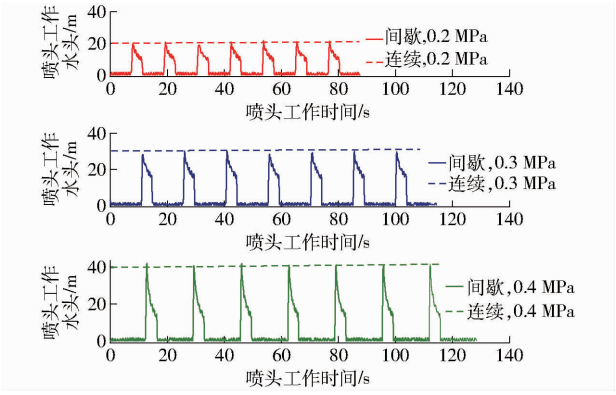

图 3　连续与间歇喷洒条件下喷头工作水头对比

Fig. 3　Comparison of sprinkler working pressure under continuous and intermittent spraying conditions

由图 4 可知，连续喷洒工作压力 0.2、0.3、0.4 MPa 下喷头流量分别为 2.99、3.39、3.54 m^3/h，而 0.2、0.3、0.4 MPa 间歇喷洒下的喷头流量为 0.89、0.60、0.61 m^3/h。由于两种喷洒模式下喷头射程相同，这意味着间歇喷洒条件下平均喷灌强度降低 70.23% ~ 82.77%。两种喷洒模式下喷头流量随工作压力的变化规律呈相反趋势。连续喷洒条件下，喷头流量随工作压力的升高而增大，符合孔口出流一般规律。间歇喷洒条件下，喷头流量随工作压力的升高而降低。这是由于间歇期时长随喷头起始工作压力升高而变长：一方面间歇期向水气罐内的注水量随喷头起始工作压力的升高而增加；另一方面由于水泵与罐体直接相连，水泵流量随罐体内压力的提升而减小。因此，尽管间歇喷洒条件下，较高的喷洒启动压力带来更高的一次喷洒量，但也减小了相同时段内的喷洒次数，间歇喷洒条件下喷头流量由一次脉冲喷洒量和喷洒次数共同决定。

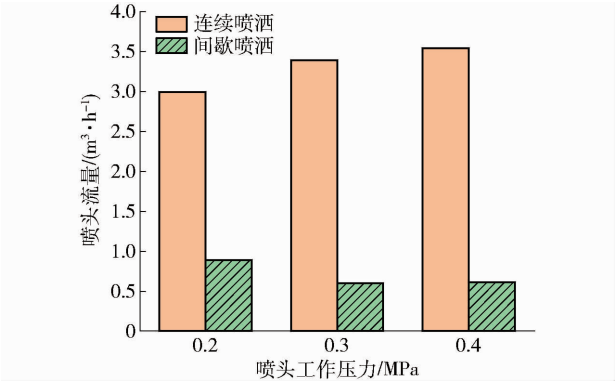

图 4　连续与间歇喷洒条件下喷头流量对比

Fig. 4　Comparison of nozzle flow under continuous and intermittent spraying conditions

2.2 径向喷灌强度

对比连续与间歇脉冲喷洒条件下的径向喷灌强度(图 5)可知,连续喷洒下的径向喷灌强度呈台阶状分布,近喷头 3 m 范围内喷灌强度较高,为 8.5 ~ 11.5 mm/h,形成一级台阶;在 3 ~ 5 m 范围内喷灌强度迅速降低至 4 ~ 6 mm/h,并在外围区域保持稳定,为二级台阶。与连续喷洒不同,间歇脉冲喷洒条件下的径向喷灌强度呈双峰型分布,除了近喷头处喷灌强度峰值之外,在 60% ~ 70% 喷头射程位置处,出现了第 2 个喷灌强度峰值。结合间歇脉冲喷洒条件下的喷头工作压力分析,在一次脉冲喷洒过程中,喷头压力呈现由大变小的动态变化,当喷头工作压力降低到低值区时,喷头射程和水流破碎程度均显著降低。如喷洒启动压力 0.4 MPa 脉冲喷洒时长 3 s 间歇喷洒条件下,喷头的工作压力低值为 0.123 MPa,此时水量集中降落的位置约为工作压力 0.4 MPa 下喷头射程的 63.2%。此外,受喷洒机制的影响,间歇脉冲喷洒在喷洒启动压力 0.2、0.3、0.4 MPa 下的峰值喷灌强度仅为连续喷洒条件的 33.0%、12.7% 和 13.0%。

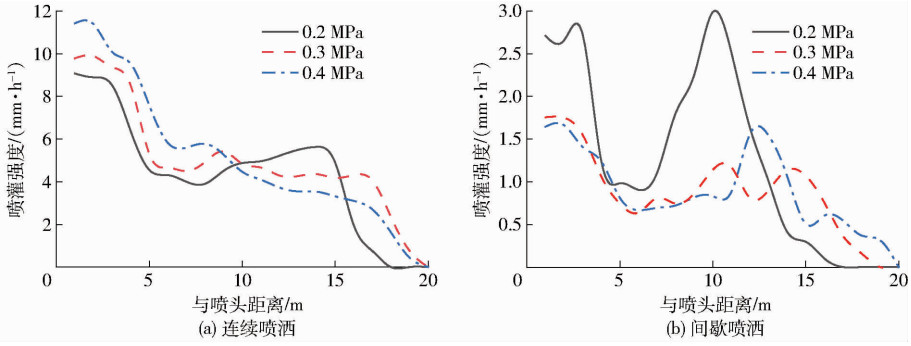

图 5 连续与间歇喷洒条件下径向喷灌强度对比

Fig. 5 Comparison of radial water distribution under continuous and intermittent spraying conditions

2.3 喷洒均匀度

图 6 为连续和间歇脉冲喷洒条件下,不同喷头组合间距典型喷洒域内水量分布的克里斯钦森均匀系数和分布均匀系数。从图中可知,间歇脉冲喷洒条件下的喷洒水量分布均匀性略低(5.8% ~ 14.1%)于连续喷洒条件,但水量分布均匀性程度仍处于可接受范围之内,除喷洒启动压力 0.2 MPa 脉冲喷洒时间 3 s 下,在大组合喷洒间距时出现了较严重的漏喷外,其他喷洒启动压力和各组合间距下的 C_u 均在 75% 以上,最高可达 83.3%,能够满足《喷灌工程技术规范》[27] 对于固定式喷灌系统喷洒均匀度不应低于 75% 的要求。间歇脉冲喷洒条件下水量分布均匀系数 D_u 一般在 70% 以上,部分组合间距下出现局部漏喷,可以通过进一步调整组合间距和一次脉冲喷洒时长进行优化。

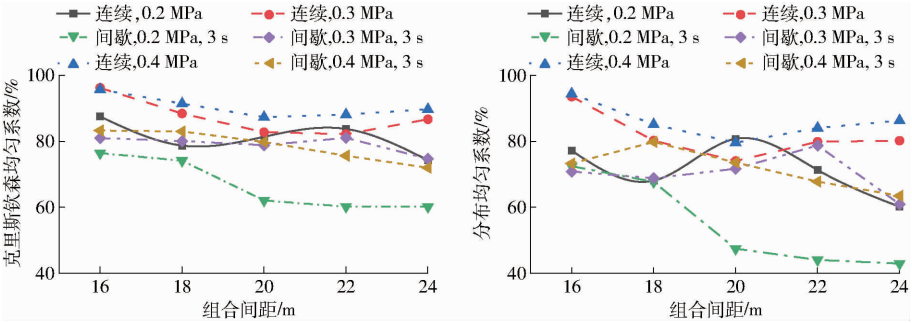

图 6 连续和间歇各工况下相邻喷头组合间距喷洒均匀系数 C_u 和 D_u 分布

Fig. 6 Distribution of uniform coefficients C_u and D_u at combined spacing between adjacent sprinklers under continuous and intermittent conditions

2.4 水滴打击强度

2.4.1 喷灌水滴粒径分布

连续喷洒条件下喷洒水滴体积加权平均粒径随与喷头距离的增加呈指数型增加(图 7)。随工作压力升高,水滴粒径呈减小趋势,喷头工作压力 0.2、0.3、0.4 MPa 下各点体积加权平均粒径的极值分别为 5.49、3.60、3.23 mm。间歇喷洒条件下喷洒水滴体积加权平均粒径与距喷头距离的增加为波动提升,不再具有指数型增加的特征。间歇式喷洒条件下各点处的体积中值粒径均大于连续喷洒条件,为后者的 1.06 ~ 3.19 倍,并且在靠近喷头射程中部的区域,两种喷洒模式下的水滴粒径存在较大差异。

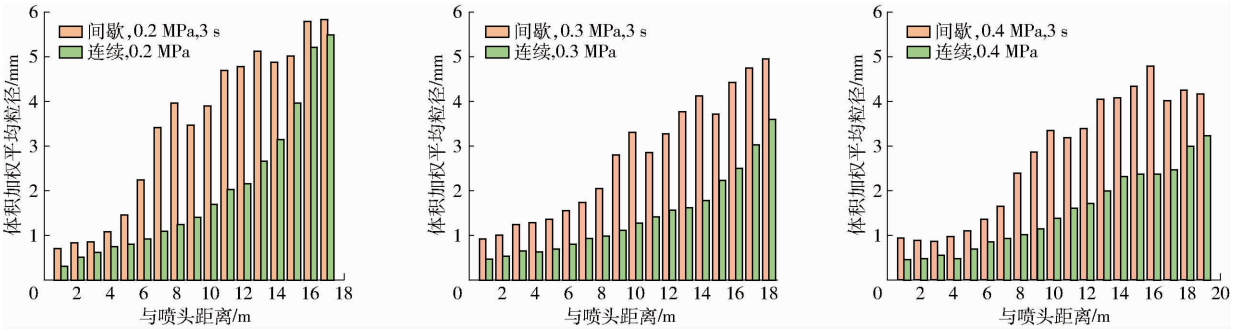

图 7　连续与间歇喷洒条件下径向水滴粒径分布对比

Fig. 7　Comparison of radial droplet size distribution under continuous and intermittent spraying conditions

为进一步明晰造成粒径差异的原因，以工作压力 0.3 MPa 距喷头 10 m 位置处的喷洒水滴的粒径组成为例进行分析。由图 5、7 可知，间歇和连续喷洒条件下，上述位置处的喷灌强度分别为 0.92 mm/h 和 4.83 mm/h，体积中值粒径分别为 1.28 mm 和 3.3 mm。以间距 0.4 mm 对水滴粒径组成进行分组，间歇和连续喷洒条件下，2 mm 以下水滴数目占总水滴数目的比例分别为 95.44% 和 99.70%（图 8a），间歇喷洒条件下存在更多大粒径水滴，粒径最大值超过 6.4 mm，而连续喷洒条件下的水滴粒径最大值不超过 3.2 mm。由不同粒径水滴的体积贡献率可知，连续喷洒条件下 2 mm 以下水滴对体积贡献率达到 98.69%，与数目占比基本一致，但间歇脉冲喷洒条件下 2 mm 以下水滴的体积贡献率仅为 34.82%，近 65% 的水量是由数目占比为 4.56% 的大粒径水滴所贡献。

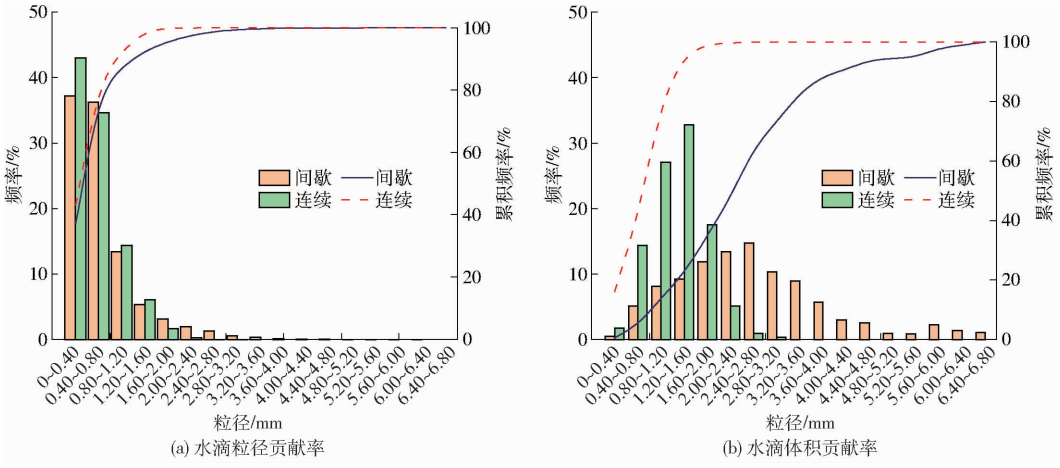

图 8　0.3 MPa 间歇和连续喷洒条件下 10 m 位置处喷洒水滴粒径与体积贡献率

Fig. 8　Particle size and volume contribution rate of spray droplets at 10 m position under intermittent and continuous spraying conditions of 0.3 MPa

由此可知，各点位置处的水滴均由不同粒径水滴组成，其中绝大多数为 2 mm 以下的小粒径水滴。与连续喷洒相比，间歇脉冲喷洒条件下的大粒径水滴数目增多，水滴粒径范围更广，2 mm 以上粒径水滴对灌水体积的贡献率达到 65% 左右，这也是造成间歇喷洒条件下体积加权平均粒径显著大于连续喷洒条件的直接原因。

2.4.2　喷灌水滴速度和动能分布

图 9 为连续与间歇喷洒条件下的水滴等效速度分布，连续喷洒条件下各点的等效速度随与喷头距离的增加呈指数型增加，与体积加权平均粒径的变化规律相似，说明大粒径的水滴具有更高的落地速度，这在朱兴业等[28]研究中得到证实。由于间歇脉冲喷洒条件下喷洒水滴粒径偏大，因而水滴等效速度也更高，为连续喷洒条件下等效速度的 1.06 ~ 2.34 倍。

与天然降水水滴相比，喷灌水滴受射流状态的影响，在水平与垂直方向均有分速度，导致水滴具有水平和垂直能量分量，并对地表产生水平剪切力和垂向压力，这是造成喷灌条件下表层土壤团聚体破碎、溅蚀和土壤结皮的重要因素。图 10 为不同工作压力下间歇脉冲喷洒和连续喷洒下各测点喷洒水滴动能的水平和垂直能量占比，连续喷洒条件下水滴动能以垂直分量为主，不同工作压力下各测点动能垂直分量占比分别为 53% ~ 95%、68% ~ 96% 和 73% ~ 96%；相同工作压力下，间歇脉冲喷洒条件喷灌水滴动能的水平分量显著提升，高于连续喷洒条件水平分量 34.5%、18.6% 和 13.5%。

为明晰造成上述动能分量差异的原因，以工作

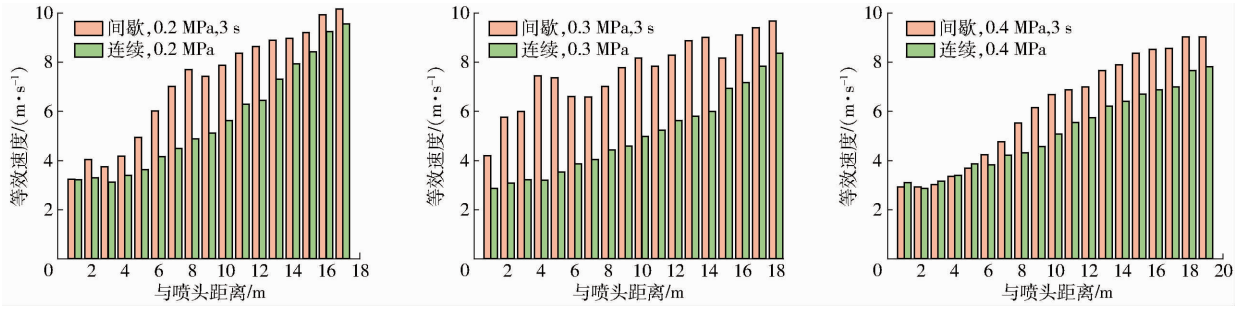

图 9 连续与间歇喷洒条件下径向水滴等效速度分布

Fig. 9 Equivalent velocity distribution of radial water droplets under continuous and intermittent spraying conditions

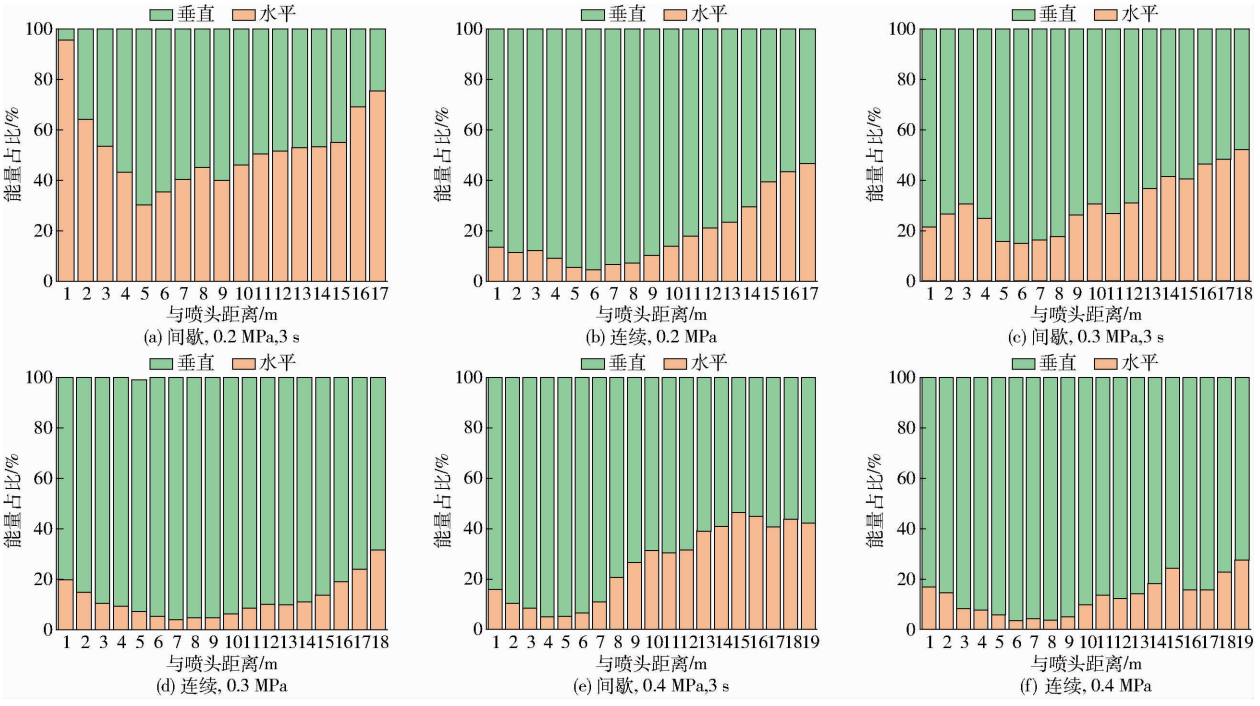

图 10 连续与间歇喷洒条件下喷洒水滴动能水平和垂直分量占比

Fig. 10 Proportion of horizontal and vertical components of kinetic energy of spray droplets under continuous and intermittent spraying conditions

压力 0.3 MPa 距喷头 10 m 位置处喷洒水滴为例,对比相同粒径水滴的落地角,如图 11 所示。连续喷洒条件下,该处水滴的水平方向速度分量较小,水滴落地角集中在 85°以上,粒径 0.5 mm 和 1.5 mm 水滴平均落地角为 85.59°和 84.71°,仅有少量水滴具有小落地角,这部分水滴可能是由大水滴二次破碎形成[29]。相比之下,间歇喷洒条件下喷洒水滴的落地角呈明显的周期性减小趋势,粒径 0.5 mm 和 1.5 mm 水滴的落地角分别为 75.47°和 75.25°,较连续喷洒下降 10°左右。这是由喷头水压的周期性升高和降低,水流从测点位置上方周期性扫过所造成的,也是间歇喷洒条件下喷洒水滴动能具有较高水平分量的直接原因。

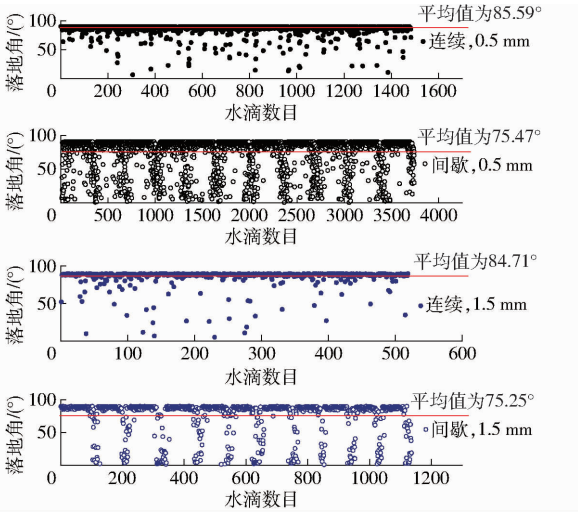

图 11 0.3 MPa 间歇和连续喷洒条件下 10 m 位置处不同水滴粒径落地角对比

Fig. 11 Comparison of drop particle size landing angle at 10 m position under intermittent and continuous 0.3 MPa spraying conditions

2.4.3 喷洒水滴动能分布

受间歇式喷洒的喷头动态工作压力的影响,距喷头相同位置处的水滴粒径和速度均高于连续喷洒条件,因此间歇喷洒条件下喷洒水滴的单位体积动

能也高于连续喷洒条件，工作压力 0.2、0.3、0.4 MPa下各测点单位体积动能较连续喷洒条件分别高 63.8%、57.2% 和 37.9%。

此外，从图 12 可知，间歇脉冲喷洒条件下的动能强度峰值内缩，向靠近喷头处偏移，这对于提升喷灌质量具有促进作用。因为从动能强度计算公式可知，喷洒水滴动能强度同时取决于该点处的单位体积动能和喷灌强度。由图 13 可知，单位体积动能随着与喷头距离的增加而升高，而连续喷洒条件下，在靠近喷头射程末端位置处，往往具有相对高值的喷灌强度，两者共同作用下将使靠近射程末端位置处产生动能强度峰值点。间歇式喷灌条件下，尽管单位体积动能也随与喷头距离的增大而增大，但由于喷灌强度峰值点明显回缩，造成单位体积动能和喷灌强度峰值的错峰效应，因而动能强度峰值也产生了内缩，并在数值上表现出明显的降低趋势，动能强度峰值降幅 50.6% ~70.9%。

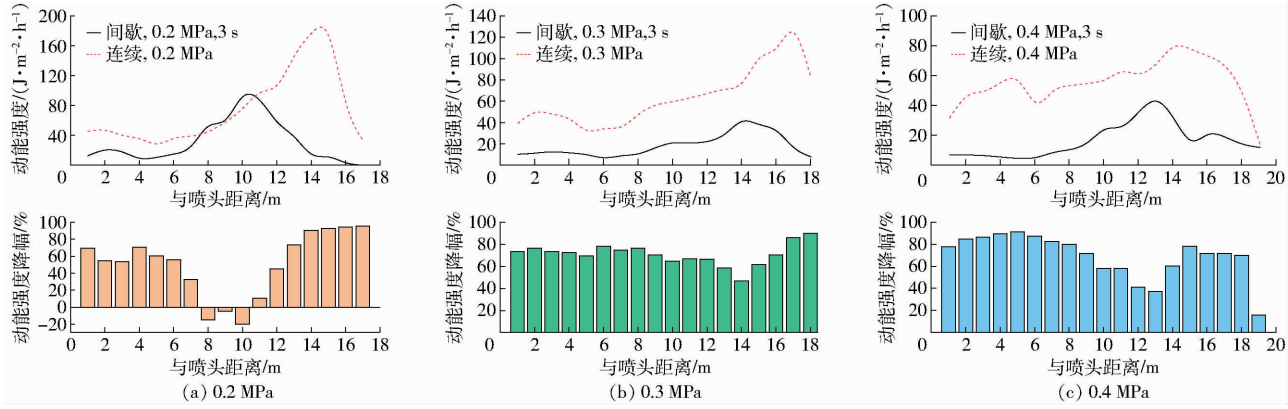

图 12　连续与间歇喷洒条件下动能强度对比

Fig. 12　Kinetic energy intensity comparison between continuous and intermittent spraying conditions

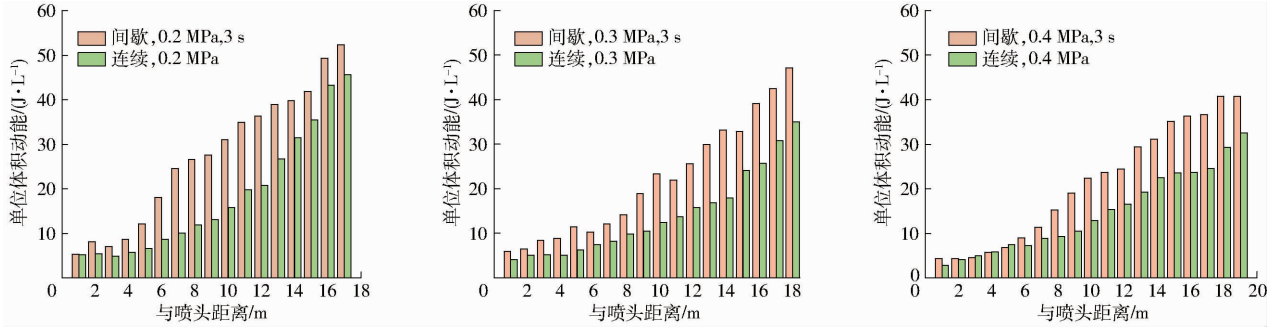

图 13　连续与间歇喷洒条件下径向单位体积动能对比

Fig. 13　Comparison of radial kinetic energy per unit volume under continuous and intermittent spraying conditions

3　讨论

本研究中，脉冲喷洒时长占喷灌总时长的 23.2% ~ 34.6%，喷头流量较连续喷洒降低 70.23% ~82.77%，降低地表径流和表层土壤侵蚀的风险。实际应用中，面对不同的气象条件、土壤与作物类型和地面坡度等对喷灌强度的实际需求，可能需适度降低喷灌强度、保证系统运行效率。此时不宜将系统流量取值过低，避免出现喷洒时间过长、蒸发漂移损失量增加等问题[30]。此时可调节间歇时长和脉冲喷洒时长所占比例对喷灌强度进行灵活调整，具体可通过喷洒水量的“供给”和“需求”两个角度达到调整目标：一方面可选择适宜的水泵型号，水泵的压力流量特性决定了向水气罐内注水的流量，进而影响脉冲式喷洒的间歇时长和喷洒时长占比；另一方面可以通过优化管路设计，实现水气罐容积、喷头类型与喷头数目间的优化匹配（如一罐一喷头、一罐多喷头等组合方式），灵活调整系统喷灌强度。

研究结果表明，间歇式脉冲喷洒水力特性受喷头动态工作压力的显著影响，这在靳彬彬[31]研究中也得到证明。本研究是在脉冲压力 0.2、0.3、0.4 MPa 和脉冲喷洒时长 3 s 内测得的，喷头的动态压力过程线和动态水压特征参数较单一。葛茂生等[11]研究了动态水压特征参数对水量分布特性的影响，可以此为切入点，通过对脉冲压力和脉冲喷洒时长的多组合择优，获得间歇脉冲喷灌条件下更加理想的喷洒水力特性。

喷灌系统具有对田间小气候独有的调节效应，通过喷洒水滴的蒸发冷却，有效抑制空气环境

温度的升高,减小作物周围环境的蒸气压差(VPD),降低作物的干旱胁迫[32]。被广泛用于冬小麦[33]、苹果[34]、草莓[35]等作物的田间小气候调节,并被证实可以有效提升作物的产量和品质[36-37],同时有助于提升喷灌水分利用效率,如研究发现喷灌对田间蒸气压差的调节效应可使中国华北平原玉米灌溉用水效率提升5%[38]。采用间歇式喷灌,在满足灌水需求的同时,可显著延长喷灌时间,这意味着对田间蒸气压差的持续性影响和对田间小气候调节效应的增强,可进一步调节获得适宜作物生长的土壤和空气温湿度,有望以尽可能低的喷灌强度对"空气-土壤-作物"连续体形成连续性和方向性影响,在提高灌溉水利用率的同时保障作物优质高效生长。

4 结论

(1)提出采用压缩空气对能量进行存储与释放调节,从而实现喷头动态水压下间歇脉冲喷洒的工作思路,并开发出实物喷灌装置,实现了动态水压和间歇脉冲喷洒同步运行模式。

(2)动态水压间歇脉冲喷洒模式下,喷头工作压力呈"急速上升—波动下降—急速下降"三阶段变化趋势,喷头流量较恒压连续喷洒降低70.23%~82.77%;径向喷灌强度呈双峰型分布,峰值喷灌强度为连续喷洒条件的12.7%~33%。动态水压间歇脉冲喷洒模式下喷洒水量分布均匀性略低于连续喷洒,但处于可接受范围之内,且可通过组合间距和脉冲喷洒时长等参数优化进一步提升喷洒均匀度。

(3)动态水压间歇脉冲喷洒模式下喷灌水的单位体积动能呈增大趋势,但由于喷灌强度大幅降低,水滴对表层土壤的打击强度显著降低,动能强度峰值降幅为50.6%~70.9%,从而有效降低了喷灌水滴的冲击作用对土壤入渗的影响。

参 考 文 献

[1] 刘俊萍,朱兴业,袁寿其,等. 中国农业节水喷微灌装备研究进展及发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2022,40(1):87-96.
LIU Junping, ZHU Xingye, YUAN Shouqi, et al. Research and development trend of agricultural watersaving sprinkler and micro-irrigation equipment in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022,40(1):87-96. (in Chinese)

[2] 刘俊萍,袁寿其,李红,等. 摇臂式喷头组合喷洒均匀性的改进[J]. 农业工程学报,2011,27(7):107-111.
LIU Junping, YUAN Shouqi, LI Hong, et al. Combination uniformity improvement of impact sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):107-111. (in Chinese)

[3] ZHANG K, SONG B, ZHU D. The influence of sinusoidal oscillating water flow on sprinkler and impact kinetic energy intensities of laterally-moving sprinkler irrigation systems[J]. Water,2019,11(7):1325.

[4] 魏洋洋,袁寿其,李红,等.异形喷嘴变量喷头水力性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(7):70-74.
WEI Yangyang, YUAN Shouqi, LI Hong, et al. Hydraulic performance experiment of the variable-rate sprinkler with non-ciecle nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(7):70-74. (in Chinese)

[5] AYMEN A, ANDREW L. Variable pulsed irrigation algorithm (VPIA) to reduce runoff losses under a low-pressure lateral move irrigation machine[J]. Horticulturae,2019,5(1):10.

[6] 刘海军,康跃虎.喷灌动能对土壤入渗和地表径流影响的研究进展[J]. 灌溉排水,2002,21(2):71-75.
LIU Haijun, KANG Yuehu. Effects of droplets kinetic energy on soil infiltration rate and surface runoff under sprinkler irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002, 21(2): 71-75. (in Chinese)

[7] MAN J, YU J, WHITE P J, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research,2014,161:26-37.

[8] 金兆森,蒋定生,田虎旗,等.喷洒水滴大小对土壤结构及作物的影响[J].喷灌技术,1981(2):31-35.

[9] 喻黎明,吴普特,牛文全.喷头组合间距、工作压力和布置形式对喷灌均匀系数的影响[J]. 水土保持研究,2002,9(1):154-157.
YU Liming, WU Pute, NIU Wenquan. Influence of the combination distance work pressure and layout form of sprinkler head on uniformity coefficient in irrigation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 154-157. (in Chinese)

[10] LI N, LIU J, ZHOU N, et al. Characteristics of rotary sprinkler water distribution under dynamic water pressure[J]. Horticulturae, 2022, 8(9): 804.

[11] 葛茂生, 吴普特,朱德兰,等. 动态水压下非旋转式折射喷头水力特性[J].农业机械学报,2015,46(2):27-33.
GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Hydraulic performance of fixed spray plate sprinkler under dynamic water pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):27-33. (in Chinese)

[12] 付博阳,惠鑫,任乃望,等. 动态水压坡地喷灌水量分布特性与均匀度研究[J].节水灌溉,2019(1):26-31.
FU Boyang, HUI Xin, REN Naiwang, et al. Water distribution and application uniformity of sprinkler irrigation with pulsating pressure on sloping land[J]. Water Saving Irrigation, 2019(1): 26-31. (in Chinese)

[13] 王新坤,姚吉成,徐胜荣,等. 负压反馈射流喷头脉冲特性及其影响规律[J]. 农业工程学报,2020,36(4):90-97.
WANG Xinkun, YAO Jicheng, XU Shengrong, et al. Pulse characteristics and influence law of negative pressure feedback jet nozzle[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 90-97. (in Chinese)

[14] 葛茂生,吴普特,朱德兰,等.卷盘式喷灌机移动喷洒均匀度计算模型构建与应用[J].农业工程学报,2016,32(11):130－137.
GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Construction and application of mobile spraying uniformity model of hard hose traveler[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(11):130－137. (in Chinese)
[15] KING B, WALL R, KINCAIL D, et al. Field testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application[J]. Applied Engineering in Agriculture,2005,21(5):847－853.
[16] 农业灌溉设备　喷头　第 3 部分:水量分布特性和试验方法:GB/T 27612.3—2011[S]. 2011.
[17] 葛茂生,吴普特,朱德兰,等. 相邻喷射流相互作用对喷洒特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(9):100－106.
GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Effect of jets interaction on spray characteristics between adjacent sprinklers[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9):100－106. (in Chinese)
[18] FUKUI Y, NAKANISHI K, OKAMURA S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity[J]. Irrigation Science, 1980, 2(1):23－32.
[19] 葛茂生. 太阳能驱动卷盘式喷灌机灌水质量与优化设计研究[D].杨凌：西北农林科技大学,2018.
GE Maosheng. Study on irrigation quality and optimal design of solar driven hard hose traveler[D]. Yangling: Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
[20] KRUGER A, WITOLD F. Tow-dimensional video disdrometer a description[J]. Journal of Antmosheric and Oceanic Techenoligy,2002,19(5): 602－617.
[21] KINCAID D, SOLOMON K, OLIPHANT J. Drop size distributions for irrigation sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 1996,39(3): 839－845.
[22] LIU J, LIU X, ZHU X, et al. Droplet characterisation of a complete fluidic sprinkler with different nozzle dimensions[J]. Biosystems Engineering, 2016, 148:90－100.
[23] BUBENZER G, JONES B. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall[J]. Transactions of the ASAE, 1971, 14(4): 851－864.
[24] WANG L, SHI Z, WANG J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 512: 168－176.
[25] KING B, BJORNEBERG D. Characterizing droplet kinetic energy applied by moving spray-plate center-pivot irrigation sprinklers[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(1): 137－145.
[26] 刘俊萍,江楠,许继恩,等.固定式太阳能喷灌系统喷洒水滴动能分布的研究[J].灌溉排水学报,2021,40(2):70－76.
LIU Junping, JIANG Nan, XU Ji'en, et al. Kinetic energy distribution of water droplets in fixed solar sprinkler irrigation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(2):70－76. (in Chinese)
[27] 喷灌工程技术规范:GB/T 50085—2007[S]. 2007.
[28] 朱兴业,刘兴发,刘俊萍,等. 全射流喷头喷洒水滴动能分布规律[J]. 农业工程学报,2015,31(15):26－31.
ZHU Xingye, LIU Xingfa, LIU Junping, et al. Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 26－31. (in Chinese)
[29] 任乃望, 胡明月, 付博阳, 等. 动态水压对坡地喷灌水滴直径分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 72－82.
REN Naiwang, HU Mingyue, FU Boyang, et al. Effect of pulsating pressure on water droplet diameter distribution for sprinkler irrigation on sloping land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(10): 72－82. (in Chinese)
[30] 李久生,饶敏杰,张建君.干旱地区喷洒水利用系数的田间试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(6):42－45.
LI Jiusheng, RAO Minjie, ZHANG Jianjun. Field evaluation of sprinkler efficiency under arid conditions[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(6):42－45. (in Chinese)
[31] 靳彬彬.基于射流脉冲的折射式喷头水力性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2021.
JIN Binbin. Hydraulic performance of spray plate sprinkler based on jet pulse[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
[32] PAOLA A, ANNA P, GAVINO S, et al. Climate change adaptation and water saving by innovative irrigation management applied on open field globe artichoke[J]. Science of the Total Environment,2019, 649:461－472.
[33] MUPAMBI G, CHMEISSER M, LOTZE E, et al. Effect of supplementary irrigation at high ambient temperatures on sunburn, plant physiology, soil andcanopy environment of 'Granny Smith' apple[J]. Acta Horticulturae,2017,1150:239－244.
[34] LIU H, KANG Y. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2006,84(1－2):3－19.
[35] GUDE K, RIVARD C, GRAGG S, et al. Day-neutral strawberries for high tunnel production in the Central United States[J]. Hort Technology,2018,28(2):12.
[36] IGNASI I, JORDI S, LAURA T, et al. The evaporative cooling effects of overtree microsprinkler irrigation on 'Mondial Gala' apples[J]. Scientia Horticulturae,2004,103(3):267－287.
[37] LIU Z, JIAO X, ZHU C, et al. Micro-climatic and crop responses to micro-sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management,2021,243:106498.
[38] ZHAO W, LI J, LI Y. Modeling sprinkler efficiency with consideration of microclimate modification effects[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2012,161:116－122.